

Mestna občina Celje
Komisija Mladi za Celje

VPLIV OBLIKE USTNIKA NA ZVOK TROBENTE

RAZISKOVALNA NALOGA

ŠIFRA: trobentice

LETNIK: 3. letnik

Celje, marec 2024

VPLIV OBLIKE USTNIKA NA ZVOK TROBENTE
RAZISKOVALNA NALOGA

ŠIFRA: trobentice

LENIK: 3. letnik

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje, 2024

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorjem za pomoč in podporo pri izdelavi raziskovalne naloge.
Hvala tudi lektorici za jezikovni pregled besedila raziskovalne naloge.

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA.....	1
1 UVOD.....	5
1.1 HIPOTEZE.....	5
1.1.1 Prva hipoteza	5
1.1.2 Druga hipoteza.....	5
1.1.3 Tretja hipoteza.....	5
1.1.4 Četrta hipoteza	5
2 TEORETIČNI DEL.....	6
2.1 KAJ JE ZVOK?	6
2.2 LASTNE FREKVENCE IN RESONANCA.....	7
2.3 LASTNO NIHANJE ZRAKA V PIŠČALIH	8
2.4 TROBENTA IN USTNIK	10
2.5 PARAMETRI	11
2.5.1 ROB	11
2.5.2 SKODELICA	11
2.5.3 DEBLO	11
2.6 ZVEN ZVOKA.....	12
METODE DELA	13
2.7 IZDELAVA USTNIKOV	13
2.8 FOURIEREVA TRANSFORMACIJA	14
2.9 IZDELAVA SUZI	15
3 REZULTATI Z RAZPRAVO	16
3.1 Navaden ustnik	16
3.2 Deblo ustnika	17
3.3 Skodelica ustnika.....	18
3.4 Rob ustnika	20
3.5 Pol zaprt ustnik	25
4 ZAKLJUČEK	27
5 VIRI	28

Slika 1: Opis valovanja	6
Slika 2: Lastno nihanje na obeh koncih zaprte piščali	9
Slika 3: Lastno nihanje na obeh koncih odprte piščali.....	9
Slika 4: Lastno nihanje polodprte piščali	10
Slika 5: Zgradba ustnika trobente.....	11
Slika 6: Spektogrami različnih inštrumentov	12
Slika 7: Ustniki, ki smo jih natisnili.....	13
Slika 8: Izvajanje meritev	13
Slika 9: Fourierjeva transformacija	14
Slika 10: Primeri različni Fourierjevih transformacij.....	15
Slika 11: Rezultati FFT za ustnik Yamaha 11B4.....	16
Slika 12: Rezultati FFT za navaden ustnik	17
Slika 13: Rezultati FFT za ustnik s kratkim deblom.....	18
Slika 14: Ustnik s plitvo skodelico.....	19
Slika 15: Ustnik z globoko skodelico	20
Slika 16: Rezultati FFT za ustnik s tankim robom	21
Slika 17: Rezultati FFT za ustnik z debelim robom	22
Slika 18: Rezultati FFT za ustnik z ugreznjenim robom	23
Slika 19: Rezultati FFT za ustnik z manj ugreznjenim robom	24
Slika 20: Rezultati FFT za navaden ustnik z ravnim robom.....	25
Slika 21: Rezultati FFT za pol zaprt ustnik.....	26

POVZETEK

V raziskovalni nalogi smo preučevali vpliv spreminjanja različnih parametrov pri ustniku na zvok trobente. Za najpomembnejše parametre, ki vplivajo na zvok trobente, smo izbrali obliko skodelice, obliko roba ustnika in dolžino debla ustnika. Najprej smo opisali zvok, zgradbo ustnika in parametre, ki jih bomo spreminjali ter zven zvoka. Za raziskovalno nalogo smo izdelali različne ustnike, osredinili pa smo se na opisane parametre. S pomočjo Fourierove transformacije smo pridobili rezultate, ki smo jih uporabili pri razpravi. Ugotovili smo, kako se razlikuje zvok trobente navadnega ustnika od ustnikov s spremenjenimi lastnostmi. Ugotovili smo tudi, kakšen zven dobi trobenta s spreminjanjem ustnikov. Dve hipotezi smo lahko z izvedenimi meritvami potrdili, dve pa ovrgli.

1 UVOD

Raziskovanja sem se lotila, ker me zanimata tako področje glasbe kot fizike. Za igranje trobente in glasbo me je navdušil moj učitelj v glasbeni šoli, fizika pa me zanima že od osnovne šole. Ker skoraj vsak dan igram trobento, me je zanimalo, kaj bi se zgodilo, če bi imela drugačen ustnik, in kako bi se razlikoval zvok trobente, če bi ustniku spreminjala obliko.

Yubiry Gonzalez in Ronaldo C. Prati sta v članku *Acoustic Descriptors for Characterization of Musical Timbre Using the Fast Fourier Transform* s Fourierjevo transformacijo opisovala zven različnih pihal (fagota, klarineta, prečne flavte in oboe). Ugotovila sta, da s spektralno analizo pihal, ki omogoča prepoznavo zvena in jo dobimo s Fourierjevo transformacijo, ne moremo vedno kategorizirati zvena različnih pihal. Predlagala sta koeficiente, s katerimi bi lahko identificirali zven pri pihalih in tudi pri ostalih inštrumentih (Gonzalez in Prati, 2022).

Ellen Jannereth in Lisa Esch sta analizirali zven violine, ukulele, klavirja, flavte in francoskega roga. Ugotovili sta, da zvena inštrumentov ni možno le analizirati, ampak je takšna analiza tudi uporabna, saj omogoča transformacijo zvena v informacije, ki jih lahko razumejo tudi računalniki (Jannereth in Esch, 2021).

V večini raziskav zvena inštrumentov so s pomočjo Fourierjeve transformacije primerjali zvoke inštrumentov in tako določili njihov zven. Tudi mi smo za analizo zvočnih posnetkov uporabili Fourierjevo transformacijo, a smo se pri našem raziskovanju osredinili le na en inštrument, tj. na trobento. Opazovali smo, kako se njen zvok spreminja, če spremenimo le obliko ustnika. Zvena trobente tako nismo primerjali z zveni drugih inštrumentov in ugotavljali, kako se njen zven razlikuje od ostalih, ampak smo spreminjali le ustnike, ki smo jih izdelali sami.

1.1 HIPOTEZE

1.1.1 Prva hipoteza

S krajšanjem debela ustnika dobi trobenta svetlejšo barvo tona.

1.1.2 Druga hipoteza

S poglobljanjem skodelice ustnika dobi trobenta temnejšo barvo tona.

1.1.3 Tretja hipoteza

S tanjšanjem roba ustnika dobi trobenta temnejšo barvo tona.

1.1.4 Četrta hipoteza

Z odpiranjem roba ustnika dobi trobenta temnejšo barvo tona.

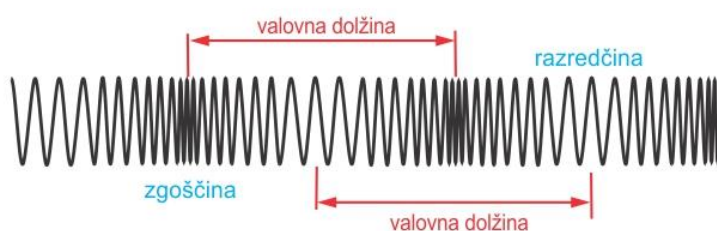
2 TEORETIČNI DEL

2.1 KAJ JE ZVOK?

V okolici nihajočih napetih open, jezičkov ali strun nastajajo v snovi zgoščine in razredčine, ki potujejo stran od izvira. Tako valovanje je zvok. Ljudje zaznavamo zvok z ušesi, zaznamo pa zvok s frekvencami približno od 20 Hz do 20 kHz. Zvok s frekvenco do 20 Hz imenujemo infrazvok, zvok s frekvenco nad 20 kHz pa ultrazvok (Mohorič in Babič, 2013).

Harmonično nihanje zraka, npr. zvok glasbenih vilic, imenujemo fizikalni ton (glasbeniki mu pravijo čista višina ali ton brez barve). Če je zvok sestavljen iz več čistih tonov, niha zrak neharmonično, a periodično. Takemu zvoku v fiziki pravimo zven. Glasbeniki ga imenujejo glasbeni ton oz. višina z barvo. Neperiodično nihanje zraka imenujemo šum. Glasbila oddajajo večinoma zven. To je zvok z osnovno frekvenco in šibkejšimi toni z višjo frekvenco, ki mu dajo barvo (Mohorič in Babič, 2013).

V fiziki obravnavamo zvok kot tisto longitudinalno valovanje, ki ga človeško uho lahko registrira oz. sliši. Izvor zvoka ali zvočilo je vsaka naprava, ki ustvarja v snovi longitudinalno valovanje, zaradi katerega se tlak v snovi periodično spreminja s frekvenco v slišnem območju. Delci pri longitudinalnem valovanju nihajo v smeri širjenja valovanja. Ker ne nihajo sočasno, ampak vsak nekoliko zakasnjeno glede na predhodnika, se v snovi pojavijo zgoščine (kjer se gostota snovi in tlak povečata) in razredčine (kjer se zmanjšata). Zgoščine in razredčine potujejo skozi snov s hitrostjo longitudinalnega valovanja – s hitrostjo zvoka. Zgoščina nastane tam, kamor se delci snovi tedaj približujejo z obeh strani, razredčina pa tam, od koder se delci snovi oddaljujejo v obe strani (Kladnik in Kodba, 2016).



Slika 1: Opis valovanja

(<https://eucbeniki.sio.si/nar7/index.html>)

Hitrost longitudinalnega valovanja v snovi z gostoto ρ in prožnostnim modulom E je:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Odziv kapljevine na stiskanje običajno opišemo s stisljivostjo, ki je s prožnostnim modulom povezana kot $\chi = \frac{1}{E}$. Hitrost vzdolžne motnje v kapljevini torej izraža enačba

$$c = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}} \quad (2)$$

Vzdolžno motnjo lahko ustvarimo tudi v plinu. Upoštevati moramo, da so spremembe hitre in toplota ne teče. Zato v izrazu za hitrost upoštevamo adiabatno stisljivost:

$\chi = \frac{1}{kp}$. k je kvocient specifičnih toplot pri stalnem tlaku in prostornini. Hitrost potovanja vzdolžne motnje skozi plin je:

$$c = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}. \quad (3)$$

Če upoštevamo plinsko enačbo, dobimo:

$$c = \sqrt{\frac{kRT}{M}}. \quad (4)$$

k je razmerje med specifično toploto pri stalnem tlaku in specifično toploto pri stalni prostornini, R je splošna plinska konstanta $8314 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T je absolutna temperatura, M je molska masa plina (Kladnik in Kodba, 2016).

Z znano hitrostjo zvoka izračunamo valovno dolžino z enačbo $\lambda = c/\nu$, če poznamo frekvenco (Strnad, 2004).

2.2 LASTNE FREKVENCE IN REZONANCA

Če okolica deluje na nihalo s periodično silo, se bo nihalo čez čas prilagodilo vzbujanju in bo nihalo s frekvenco vzbujanja, ne pa z lastno frekvenco. Tako nihanje je vsiljeno, frekvenca s katero niha nihalo in z njo delujejo sile iz okolice, pa je vsiljena frekvenca (Mohorič in Babič, 2013).

Ko okolica vzbuja nihalo z njegovo lastno frekvenco, je odziv nihala največji, takrat sta nihalo in okolica, ki mu nihanje vsiljuje, v resonanci. Izraz izvira iz akustike in pomeni sozvočje. Z izrazom resonanca označujemo lastnost nihajočega sistema, da se na različne vsiljene frekvence odzove z različnimi amplitudami nihanja (Mohorič in Babič, 2013).

Resonanca je pomemben pojav v akustiki. Ustrezno oblikovana škatla (resonator), okrepi zvok, ki ga oddaja zvočilo. Ko zatresemo glasbene vilice, slišimo (dokaj šibek) zvok, ki ga oddajajo. Če glasbene vilice prislonimo ob ustrezno votlo telo, je razlika v jakosti zvoka očitna (Mohorič in Babič, 2013).

2.3 LASTNO NIHANJE ZRAKA V PIŠČALIH

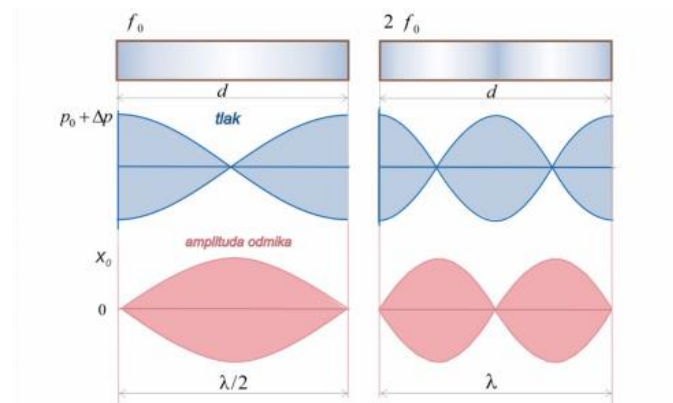
Zvok pri trobilih in pihalih povzročamo s tresenjem napetih ustnic, to tresenje v instrumentu, npr. v trobenti ali piščali, vzbuja dodaten zvok, ki prvotnega ojači in olepša. Recimo, da imamo piščal (dolgo votlo cev), z dolžino d (to je dolžina zračnega stebra v cevi), ki je na obeh straneh zaprta (Kladnik in Kodba, 2016).

Ravno zvočno valovanje, ki ga sprožimo v cevi (recimo, s tresenjem čelnega prereza cevi), se širi vzdolž cevi (širjenja v prečnih smereh ne upoštevamo), se na koncih cevi odbije in večkrat potuje po cevi sem ter tja, pri čemer interferira s samim seboj, tako da lahko nastane (če je le njegova frekvenca prava) stoječe zvočno valovanje. Zanj so značilni vozli, v katerih delci zraka sploh ne nihajo (tam je amplituda odmikov stalno nič). Ker se gostota zraka oz. zvočni tlak pri longitudinalnem valovanju najmočneje spreminja, tam kjer je amplituda nič, je torej v vozlih amplituda zvočnega tlaka oz. amplituda spremembe gostote. Kjer je amplituda odmikov zračnih delcev iz njihovih ravnovesnih leg, je vozel zvočnega tlaka (tam se tlak ne spreminja) (Kladnik in Kodba, 2016).

Če je cev na obeh straneh zaprta, zračni delci na koncih cevi ne morejo nihati, saj se z viskozni silami prilepijo ob cev. Torej so v zaprti piščali možna le takšna stoječa valovanja (oz. lastna nihanja zraka), pri katerih sta na koncih piščali vozla odmikov oz. hrbta zvočnega tlaka (Kladnik in Kodba, 2016).

Osnovno lastno nihanje z najmanjšo možno frekvenco zraka v piščali je takšno, da zračni delci najmočneje nihajo (z največjo amplitudo) na sredini piščali, na njenih koncih pa sta vozla odmika. Pri takšnem lastnem nihanju zraka se tlak na sredini cevi ne spreminja, tam je vozel zvočnega tlaka. Na koncih piščali se gostota zraka spreminja najmočneje. Dolžina b zračnega stebra je enaka polovici valovne dolžine valovanja, ki ustvarja to lastno nihanje. Tu je c hitrost zvoka v zraku ($= 340$ m/s). Osnovna frekvenca lastnega nihanja v piščali je tem nižja, čim daljša je piščal. Ko nihajo zračni delci na levi v levo, nihajo delci na desni na desno in obratno. Razdalja med sosednjima vozla je polovica valovne dolžine, je valovna dolžina valovanja, ki ustvarja prvo višje harmonično nihanje zraka, enaka polovici dolžine cevi. Frekvenca je dvakrat večja od osnovne, kar velja tudi za vsa druga višje harmonična nihanja. Zrak v zaprti podolgovati piščali z dolžino b lahko niha z osnovno frekvenco ter njenimi celoštevilčnimi mnogokratniki (Kladnik in Kodba, 2016).

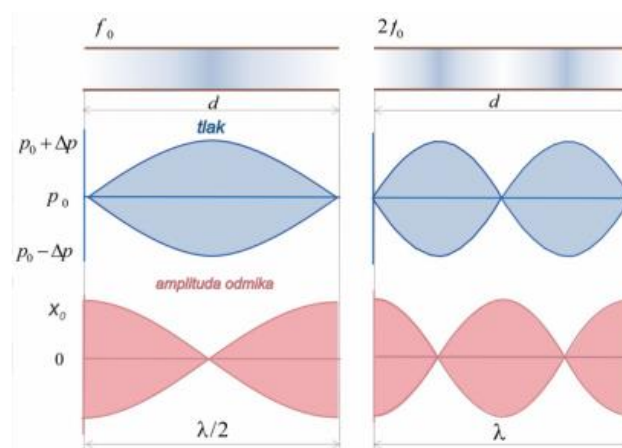
Vpliv oblike ustnika na zvok trobente



Slika 2: Lastno nihanje na obeh koncih zaprte piščali

(https://si.openprof.com/wb/poglavje:%C5%A1irjenje_in_odboj_zvoka/338/?utm_source=pdf)

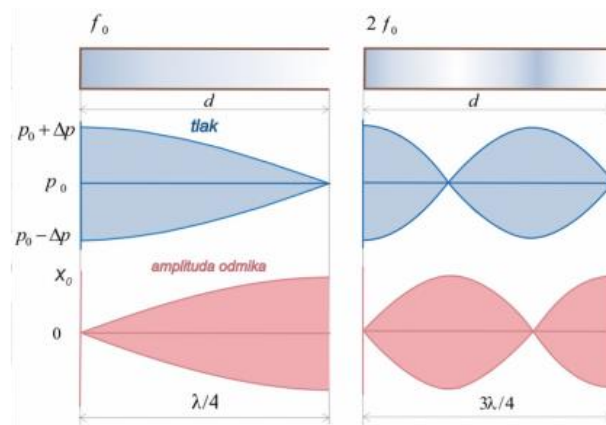
Podobno niha zrak v piščali, ki je na obeh straneh odprta, le da sta tu hrbet odmika in vozle zvočnega tlaka na koncih piščali. Na koncu piščali se zračni tlak ne more spreminjati, saj je zunaj stalen zračni tlak. Zračni delci pa lahko tam močneje nihajo, osnovna frekvenca je enaka kot pri zaprti piščali. Zrak lahko niha z vsemi celoštevilčnimi mnogokratniki osnovne frekvence (Kladnik in Kodba, 2016).



Slika 3: Lastno nihanje na obeh koncih odprte piščali

(https://si.openprof.com/wb/poglavje:%C5%A1irjenje_in_odboj_zvoka/338/?utm_source=pdf)

Drugače pa niha zrak v piščali, ki je odprta le na eni strani – v pol odprti piščali. Ob zaprtem koncu je vozle odmika oz. hrbet tlaka, ob odprtem pa hrbet odmika oz. vozle tlaka. Dolžina zračnega stebra je tu enaka četrtini valovne dolžine. Osnovna frekvenca je v primerjavi z zaprto piščaljo manjša za faktor 2. Če zaprto cev na eni strani odpremo, se osnovna frekvenca zniža za polovico, oddani ton se zmanjša za oktavo. Razlika je tudi pri višje harmoničnih tonih. Vozle odmika je ob zaprtem koncu cevi in na tretjini dolžine piščali stran od konca. Pri naslednjem višje harmoničnem nihanju sta v notranjosti na eni petini in treh petinah dolžine od odprtega konca. Napol odprta piščal lahko niha z osnovno frekvenco in njenimi lihimi mnogokratniki, ima manj višje harmoničnih nihanj kot povsem odprta ali zaprta piščal, zato je barva zvenov slabša. Računanje lastnih frekvenc se tako zelo zaplete, če upoštevamo, da se zvok širi v vse smeri in če prostor nima lepih geometrijskih oblik. Lastne frekvence določimo eksperimentalno s pomočjo resonančnega nihanja zraka (Kladnik in Kodba, 2016).



Slika 4: Lastno nihanje polodprte piščali

(https://si.openprof.com/wb/poglavje:%C5%A1irjenje_in_odboj_zvoka/338/?utm_source=pdf)

2.4 TROBENTA IN USTNIK

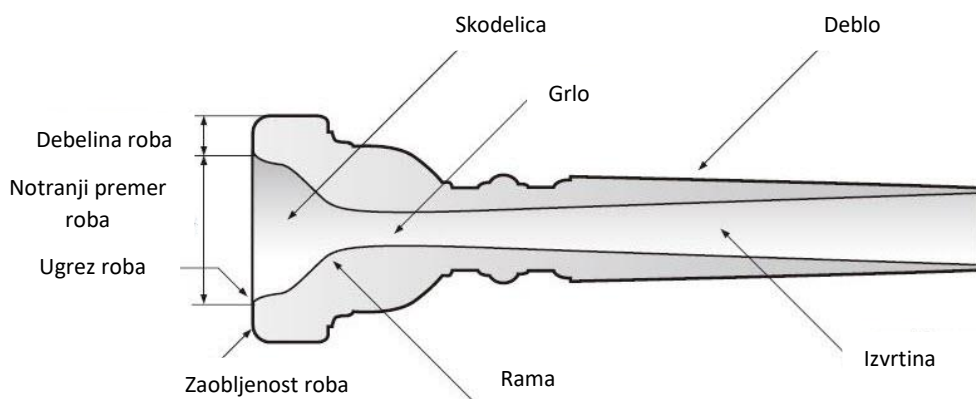
Inštrumenti so priprave, ki izkoriščajo mehanske sile oz. dejavnosti glasbenega izvajalca in jih pretvarjajo v posebna slišana zračna nihanja, zvok. Trobenta spada v skupino trobil. Zvok pri njej vzbujajo ustnice. V to skupino spadajo še gozdni rog, kornet, pozavne, tuba, helikon in fanfare. Po letu 1850 sta v orkestrih zavladali trobenti B in C, ki sta zveneli za oktavo višje kot stari instrumenti. Poleg trobente B so v preteklosti uporabljali tudi C, D, Es, E, predvsem pa F. (Adlešič, M. 1964).

Ustnice so pri trobilih vir nihanja, ki ga instrument širi v prostor. Ko so napete zavibrirajo, ko pihnemo skozi njih. Tesno se morajo združiti z instrumentom, da je točka združitve ustnic in ustnika zatesnjena za zrak (Farkas, P. 1992).

Ustniki so bili v preteklosti narejeni iz več materialov, npr. iz lesa, kosti, slonovine, ki pa se niso izkazali za primerne. Leseni niso bili odporni na vlago in različne temperature, kost in slonovina pa se hitro zlomita. Kot najboljša materiala za izdelavo ustnikov sta se izkazala kovina in plastika (Wilcox, 1957).

Ustnik je sestavljen iz različnih delov, angleška poimenovanja teh pa (še) nimajo slovenskih ustreznice, zato bomo v nadaljevanju naloge uporabljali slovenske izraze, ki najbolj ustrezajo angleškim.

Del ustnika, s katerim se dotikamo ustnic, imenujemo rim/rob. Konkavna površina v notranjosti ustnika pod robom je cup/skodelica. Skodelici sledi throat/grlo, tj. majhen, cilindrični del med kotlom in backbore/hrbto cevjo (Wilcox, 1957).



Slika 5: Zgradba ustnika trobente

(https://hub.yamaha.com/wp-content/uploads/2017/01/BrassMpc_Parameterscroppedbannercd.jpg)

2.5 PARAMETRI

Profesionalni glasbeniki se odločajo za večje ustnike, s katerimi lahko dosežemo z malo truda največji volumen tona. Pri večjih ustnikih se ustnice med seboj ne dotikajo, tako ti ustniki naredijo čistejši ton. Večji premer skodelice prav tako omogoča večjemu delu ustnic, da vibrirajo in posledično ima ton večji volumen (Conn-Selmer, Inc, 2016).

2.5.1 ROB

Širok rob poveča vzdržljivost, ozek pa izboljša obseg in tonski razpon. Okrogel oz. zaobljen rob izboljša udobje, oster pa izboljša točnost tona (Conn-Selmer, Inc, 2016).

2.5.2 SKODELICA

Velika in globoka skodelica na splošno ponuja manj upora v nižjem registru inštrumenta. Upor se pri igranju stopnjuje ob postopnem prehajanju v višji register. Manjša in plitva skodelica nudi manj upora med igranjem v višjem registru, upor se postopno povečuje ob prehajanju v nižji register. Velika lahko izboljša volumen in kontrolo, majhna lajša utrujenosti in šibkost. Globoka potemni ton, predvsem v spodnjem registru, plitva pa ga posvetli in izboljša odzivnost, predvsem v višjem registru (Conn-Selmer, Inc, 2016).

Veliko grlo poveča svobodo pihanja in glasnost, ton pa izostri v visokem registru (največje velikosti izostrijo tudi nizek register). Majhno grlo poveča odpornost, vzdržljivost in sijaj ter vzravna visok register (Conn-Selmer, Inc, 2016).

2.5.3 DEBLO

Debla, razen na splošno, ni mogoče opredeliti po velikosti, saj se razlikujejo tudi po obliki. Kombinacije velikosti in oblike lahko naredijo ton temnejši ali bolj sijoč, lahko ga dvignejo ali znižajo v enem ali več registrih ter povečajo ali zmanjšajo glasnost. Vselej pa je učinek odvisen od uporabljenega grla in skodelice v kombinaciji z deblom. Če je deblo ustnika premajhno, je visok register zamašen in nizek, če pa je preveliko, postane glasbenik izčrpan (ni upora) (Conn-Selmer, Inc, 2016).

2.6 ZVEN ZVOKA

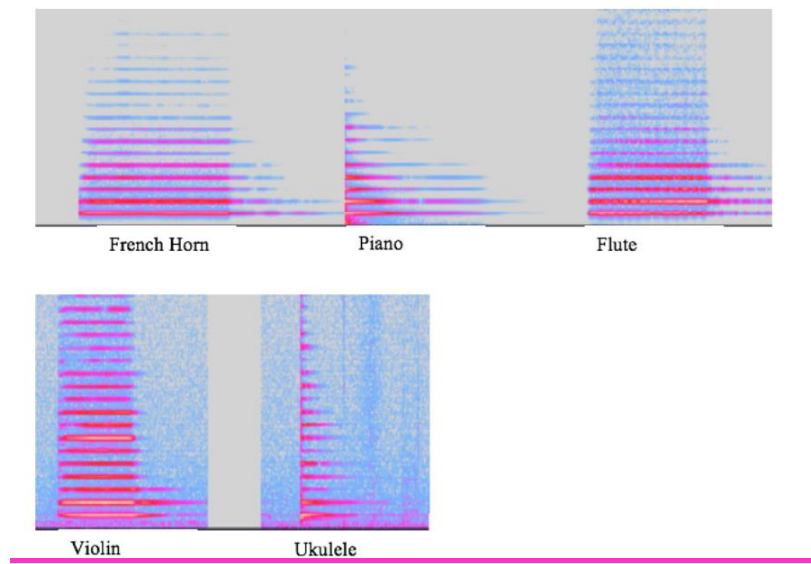
Zven je lastnost tona, zaradi katerega lahko razlikujemo med dvema različnima zvokoma, čeprav imata enako frekvenco. Po zvenu lahko torej med seboj razlikujemo različne inštrumente, saj ima vsak od njih edinstven zvonen. Zven lahko imenujemo tudi kvaliteta ali barva zvoka (Halliday, Resnick in Walker, 2013).

Edinstveni zvonen zvoka temelji na različnih harmoničnih frekvencah, iz katerih je sestavljeno njegovo zvočno valovanje. Z metodo Fourierjeve transformacije je mogoče obliko valovanja enostavno pretvoriti iz časovne odvisnosti (tega, kar zazna mikrofona) v frekvenčno. Z izvedbo spektralne analize frekvenc lahko opišemo zvonen zvoka (Jannereth in Esch, 2021).

Uporaba različnih besed za opis zvena je zelo subjektivna, saj vsak posameznik zaznava zvok drugače. Glede na študijo, ki so jo izvedli na Akademiji za uprizoritvene umetnosti v Pragi, so bile besede »temno«, »svetlo«, »ozko« in »polno« med besedami, ki veljajo za »najprimernejše« pri opisovanju tona (Jannereth in Esch, 2021).

Inštrumenti z večjo povprečno intenzivnostjo višjih harmoničnih frekvenc imajo svetlejši zvonen, tisti z manjšo intenzivnostjo pa temnejšega. Podobno pomeni večji razpon harmonskih frekvenc v harmonskem spektru bolj polno barvo zvoka, manjši razpon pa prazno barvo (Jannereth in Esch, 2021).

Spektrogram vsakega inštrumenta ponazarja prisotne frekvence, ki jih predstavljajo vodoravne črte. Dolžina vsake črte odraža, kako hitro določene frekvence upadejo v primerjavi z drugimi prisotnimi (Jannereth in Esch, 2021).



Slika 6: Spektrogrami različnih inštrumentov

(<https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/8b0f6d1e4d86687580dc3c9ac4925fd7837e53c9/7-Figure4-1.png>)

METODE DELA

2.7 IZDELAVA USTNIKOV

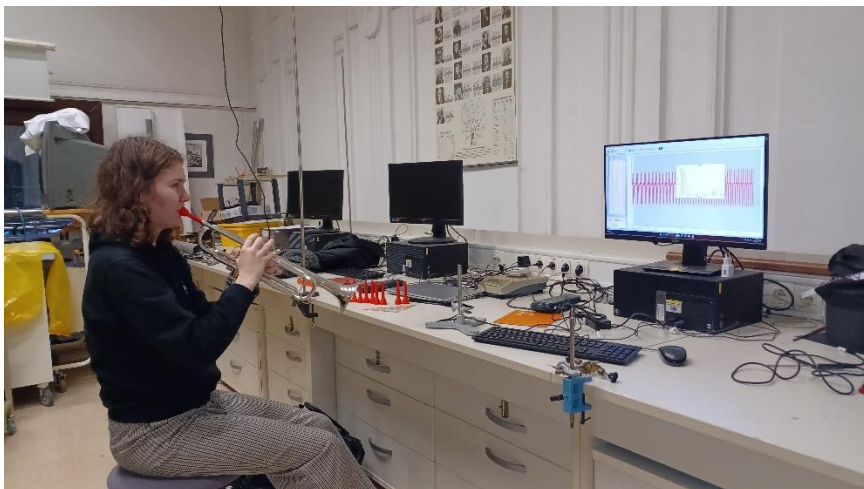
Da bi lahko spreminjali parametre ustnikov, smo se odločili, da jih natisnemo s 3d-tiskalnimom.

Za modeliranje ustnikov smo uporabili program Autodesk Fusion 360. Kot osnovo ustnika smo uporabili ustnik za trobento Yamaha 11B4. Izmerili smo debelino njegovega roba, globino skodelice, dolžino debla in premer grla. Obliko skodelice smo spremenili v obliko valja. Ustnikom smo nato spreminjali navedene parametre.



Slika 7: Ustniki, ki smo jih natisnili

Ko smo ustnike natisnili, smo izmerili njihove lastne frekvence s pomočjo mikrofona. S Fourierevo transformacijo smo dobili frekvenčne spektre ustnikov.



Slika 8: Izvajanje meritev

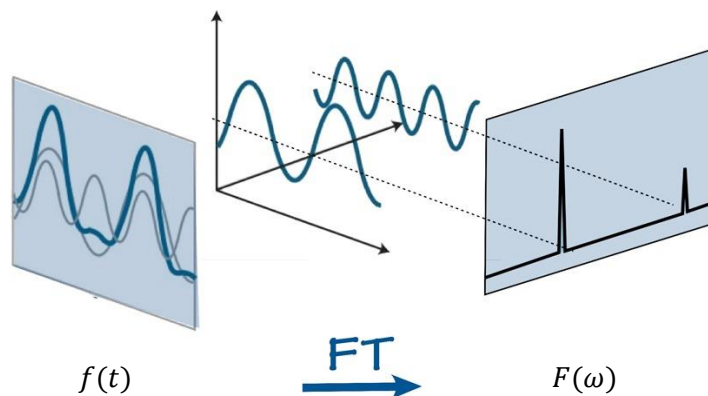
2.8 FOURIEREVA TRANSFORMACIJA

Fourierova transformacija definirana prehod med frekvenčnim in časovnim prostorom.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{i\omega t} dt \quad (5)$$

S to enačbo lahko ugotovimo, katere frekvence obstajajo v signalu $f(t)$. Omogoča nam prehod med domeno časa in domeno frekvenc.

Slika 9 prikazuje shematski prikaz meritve napetosti v odvisnosti od časa (levo), ki jo nato pretvorimo v graf napetosti v odvisnosti od frekvence (desno).



Slika 9: Fourierova transformacija

(<https://stemporium.blog/2023/04/13/what-is-the-fourier-transform-and-how-is-it-used-in-image-processing/>)

Primeri značilnih Fourierovih transformacij izgledajo kot na sliki 10. Fourierova transformacija sinusnega vala je ozek vrh. Fourierova transformacija belega šuma je približno enakomerno porazdeljena. Pri Fourierovi transformaciji zvoka trobente je prvi harmonik nosilni ton ostali pa so alikvotni.

Vpliv oblike ustnika na zvok trobente



Slika 10: Primeri različni Fourierevih transformacij

2.9 IZDELAVA SUZI

Da bi bil naš eksperiment ponovljiv in da bi dobili čim natančnejše podatke, smo poskusili izdelati samodejna usta za igranje oz. SUZI. Tudi ta smo zmodelirali v programu Autodesk Fusion 360.

SUZI so zgrajena iz škatle, ki imajo podoben volumen kot ustna votlina, da bi se čim bolj približali dejanskim pogojem. Skozi ustno votlino potuje zrak, ki prispe do luknjice, ki se dotika dveh silikonskih cevi, ki predstavljata ustnice. Vhodni tlak zraka reguliramo z manometrom.

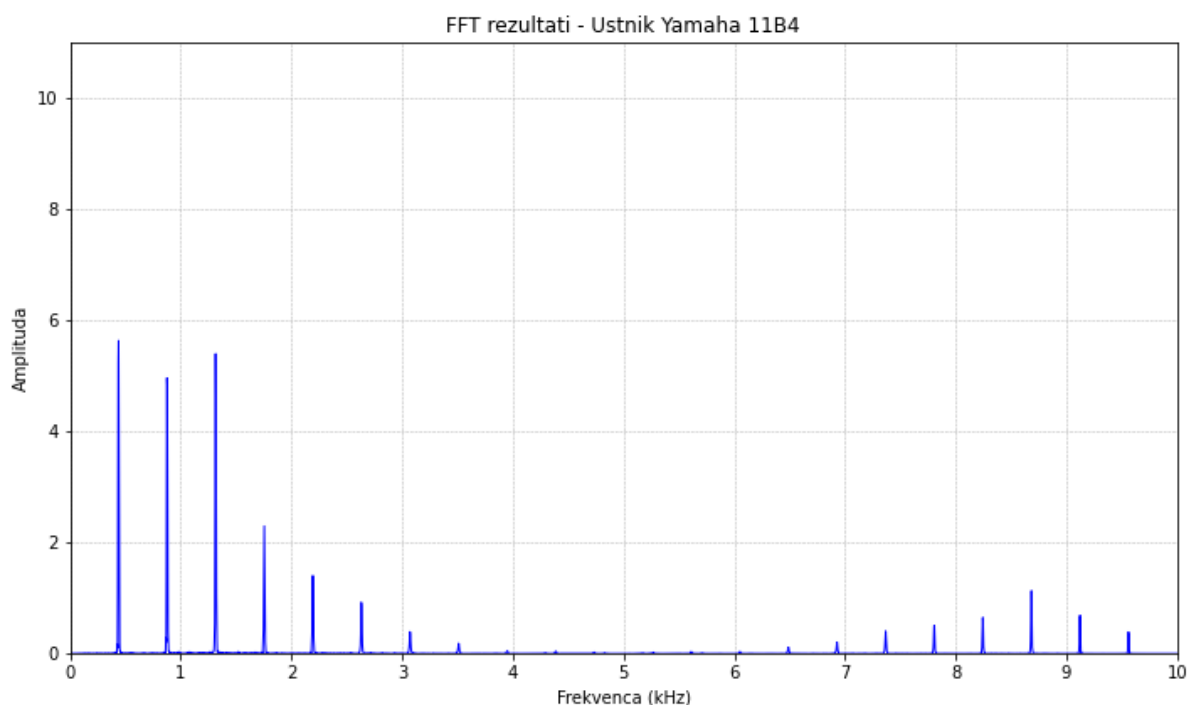
Ker pa nam v tej raziskovalni nalogi še ni uspelo usposobiti SUZI, ostaja to kot načrt za nadaljnje delo in raziskovanje.

3 REZULTATI Z RAZPRAVO

Z meritvami smo dobili signale, ki smo jih, kot je opisano v metodologiji, pretvorili v frekvenčne diagrame, iz katerih pa smo sklepali o barvi tona in ostalih vplivih spreminjanja parametrov na zvok trobente.

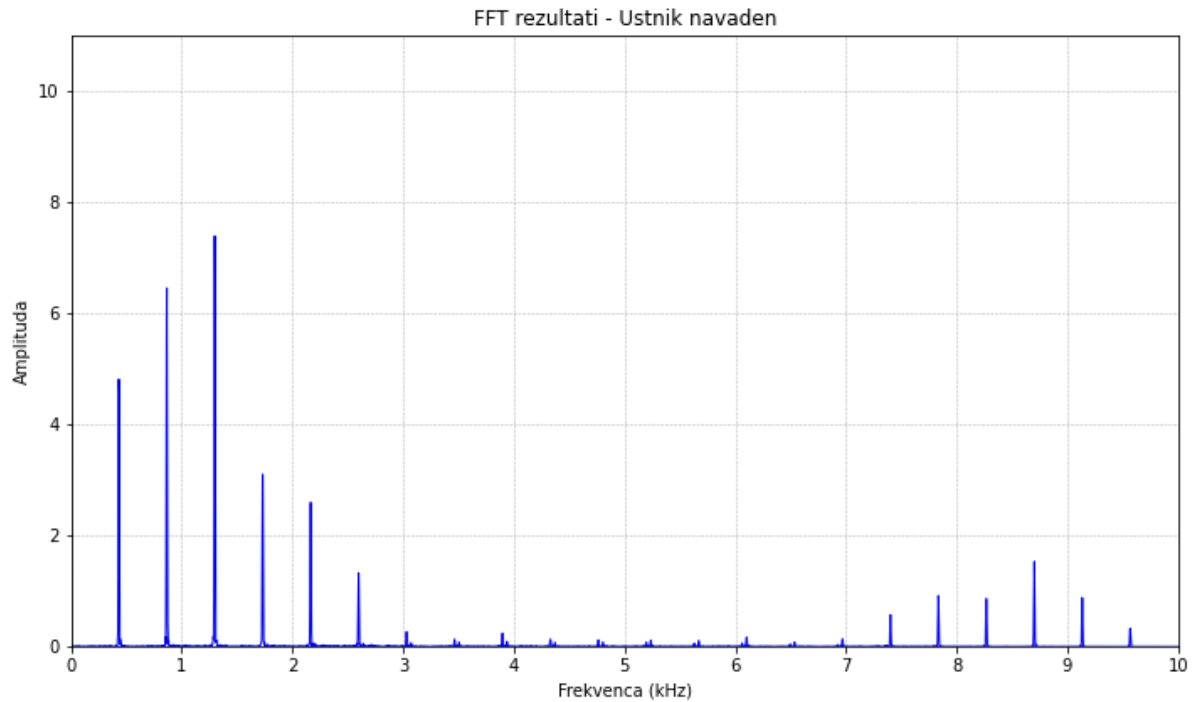
3.1 Navaden ustnik

Na sliki 11 lahko vidimo, da je porazdelitev osnovne frekvence in naslednjih dveh višjih harmonskih frekvenc po intenziteti približno enaka, naslednjih petih pa pada. P 6 kHz opazimo značilno vnovično pojavljanje višjih harmonikov, ki pa je verjetno posledica lastnosti trobente, ker se pojavlja pri vseh meritvah.



Slika 11: Rezultati FFT za ustnik Yamaha 11B4

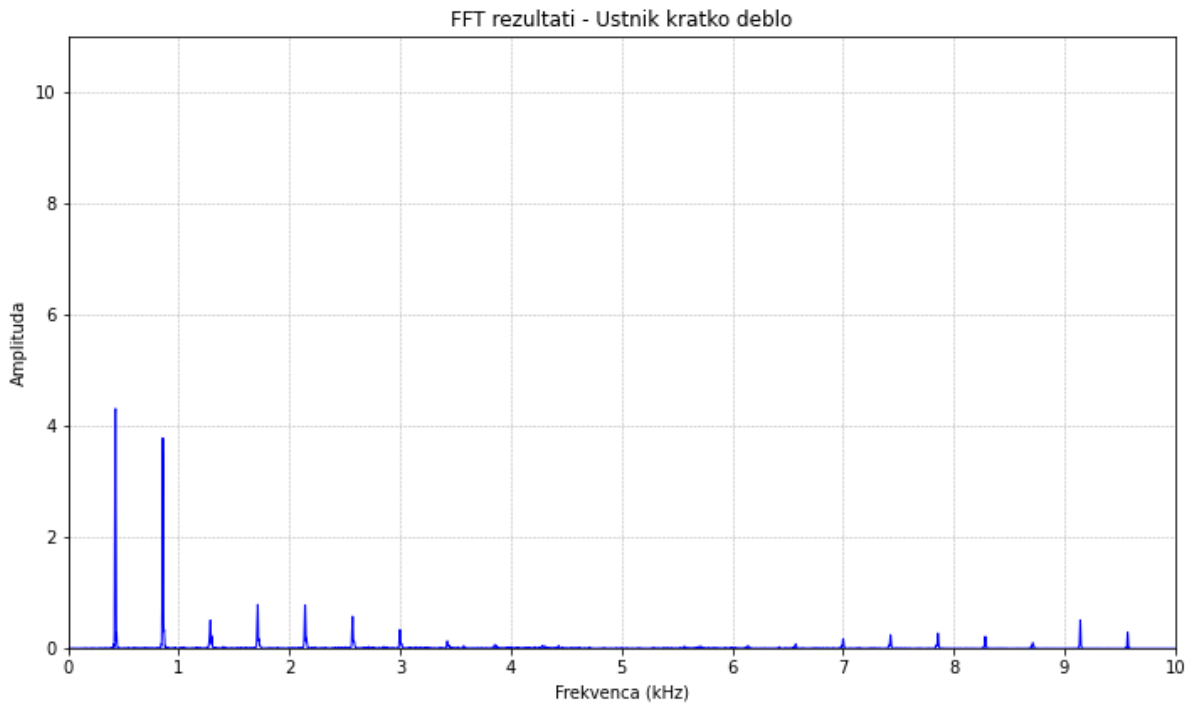
Z navadnim ustnikom smo se želeli čim bolj približati ustniku Yamaha 11B4. Navaden ustnik ima enake mere parametrov kot ustnik Yamaha 11B4, ampak je preprostejši, spremenili smo namreč obliko skodelice v valj, deblo ustnika in cev pa sta ravna. Podobno kot pri ustniku Yamaha 11B4 lahko na sliki 12 vidimo, da je intenziteta osnovne frekvence in naslednjih dveh višje harmonskih frekvenc večja kot pri ostalih višjih harmonskih frekvencah. Za razliko od ustnika Yamaha 11B4 pa intenziteta od osnovne frekvence do druge višje harmonske frekvence narašča. Intenziteta frekvenc začne po drugi višji harmonski frekvenci tako kot pri ustniku Yamaha 11B4 padati, ne pade pa tako močno kot pri ustniku Yamaha 11B4. Po 6 kHz ponovno opazimo višje harmonike.



Slika 12: Rezultati FFT za navaden ustnik

3.2 Deblo ustnika

Navadnemu ustniku smo skrajšali deblo, da bi preverili, kako njegova dolžina vpliva na zvok trobente. Na sliki 13 lahko vidimo, da ima ta za razliko od ustnika Yamaha 11B4 in navadnega ustnika višjo intenziteto le pri osnovni in prvi višji harmonski frekvenci. Intenziteta nato močno pade in je pri naslednjih višjih harmonskih frekvencah do 3 kHz približno enaka. Višje harmonike pa nato spet opazimo na istem mestu kot pri prejšnjih dveh ustnikih. Ta ustnik ima manjši razpon harmonskih frekvenc kot ustnik Yamaha 11B4, zato pravimo, da ima bolj prazno barvo. Ker ima ustnik s kratkim deblom manjšo intenziteto višjih harmonskih frekvenc kot navaden ustnik in ustnik Yamaha 11B4, ima temnejšo barvo.

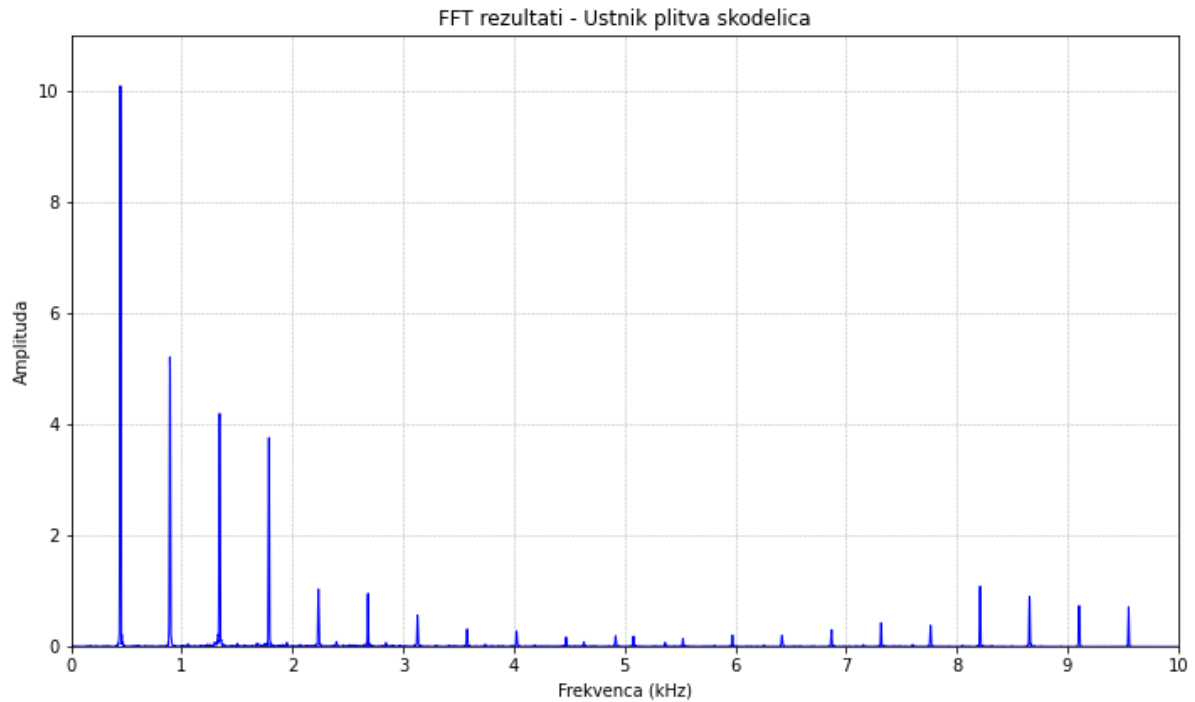


Slika 13: Rezultati FFT za ustnik s kratkim deblom

3.3 Skodelica ustnika

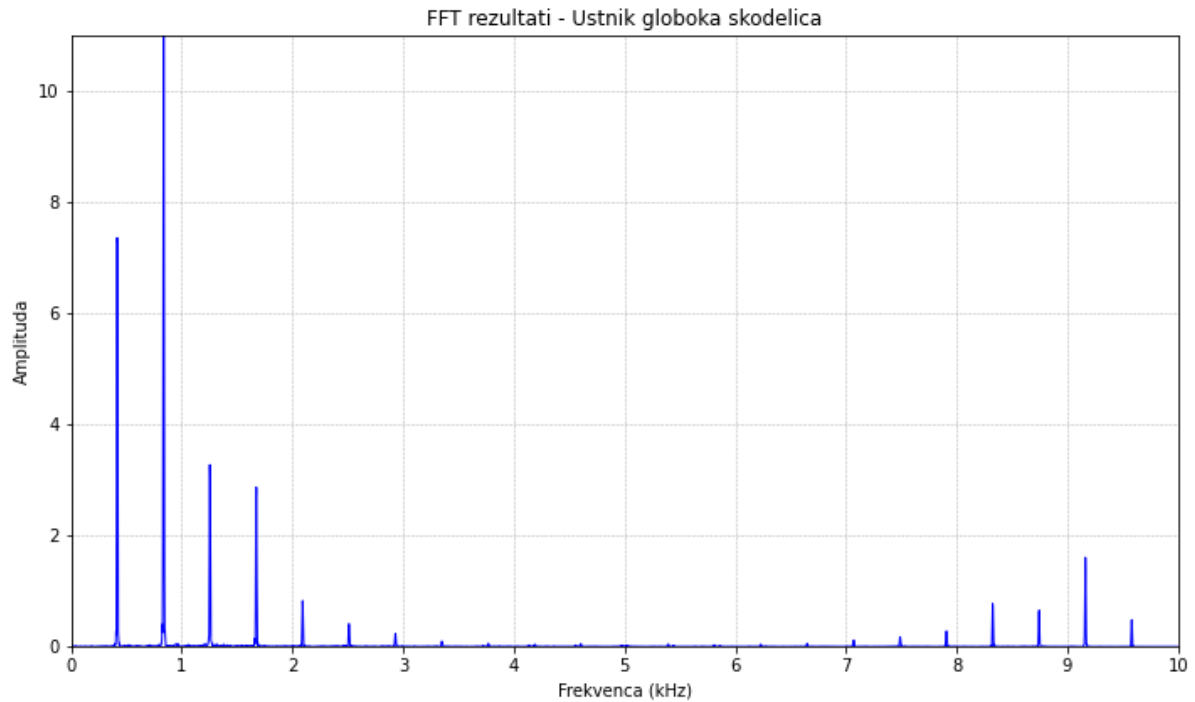
Zanimalo nas je tudi, kako globina skodelice vpliva na zvok trobente, zato smo naredili dva ustnika. Prvemu smo globin o skodelice zmanjšali, drugemu pa povečali.

Za ustnik s plitvo skodelico lahko vidimo porazdelitev frekvenc na sliki 14. Osnovna frekvenca ima veliko višjo intenziteto kot osnovna frekvenca pri ustniku Yamaha 11B4. Nato se intenziteta naslednje višje harmonske frekvence močno zmanjša, a je še vseeno visoka. Intenziteta od prve do tretje višje harmonske frekvence pada, močnejše pa spet pade po tretji višji harmonski frekvenci. Intenziteta višjih harmonskih frekvenc pa ne pade povsem. Ustnik s plitvo skodelico ima večjo povprečno intenzivnost višjih harmoničnih frekvenc kot ustnik Yamaha 11B4, zato ima svetlejši zven. Ima tudi večji razpon višje harmonskih frekvenc, saj intenziteta višjih harmonskih frekvenc ne pade toliko kot pri ustniku Yamaha 11B4, zato ima tudi nekoliko polnejšo barvo.



Slika 14: Ustnik s plitvo skodelico

Na sliki 15 je prikazana porazdelitev frekvenc za ustnik z globoko skodelico. Intenziteta prve višje harmonske frekvence je tu veliko večja kot intenziteta osnovne frekvence. Intenziteta osnovne in prve višje harmonske frekvence je večja od ostalih višje harmonskih frekvenc. Po prvi višje harmonski frekvenci intenziteta pade; pri ustniku Yamaha 11B4 je padla po drugi višji harmonski frekvenci. Intenziteta naslednjih petih višjih harmonskih frekvenc tudi tu pada. Pri ustniku z globoko skodelico je sicer intenziteta osnovne frekvence in prve višje harmonske frekvence velika, vendar je intenziteta višjih harmonskih frekvenc po intenziteti manjša kot pri ustniku s plitvo skodelico. Tako lahko rečemo, da ima ta ustnik v primerjavi z ustnikom s plitvo skodelico temnejšo barvo. Ker ima manjši razpon harmonskih frekvenc kot ustnik s plitvo skodelico, ima tudi bolj prazno barvo.

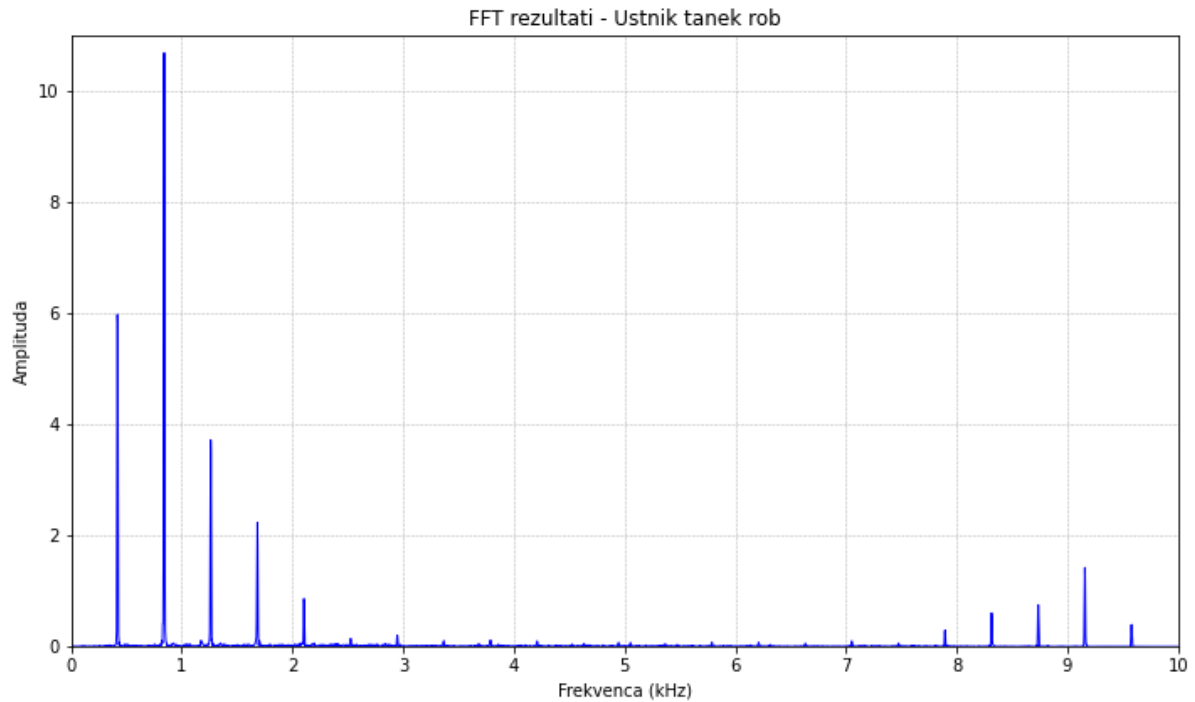


Slika 15: Ustnik z globoko skodelico

3.4 Rob ustnika

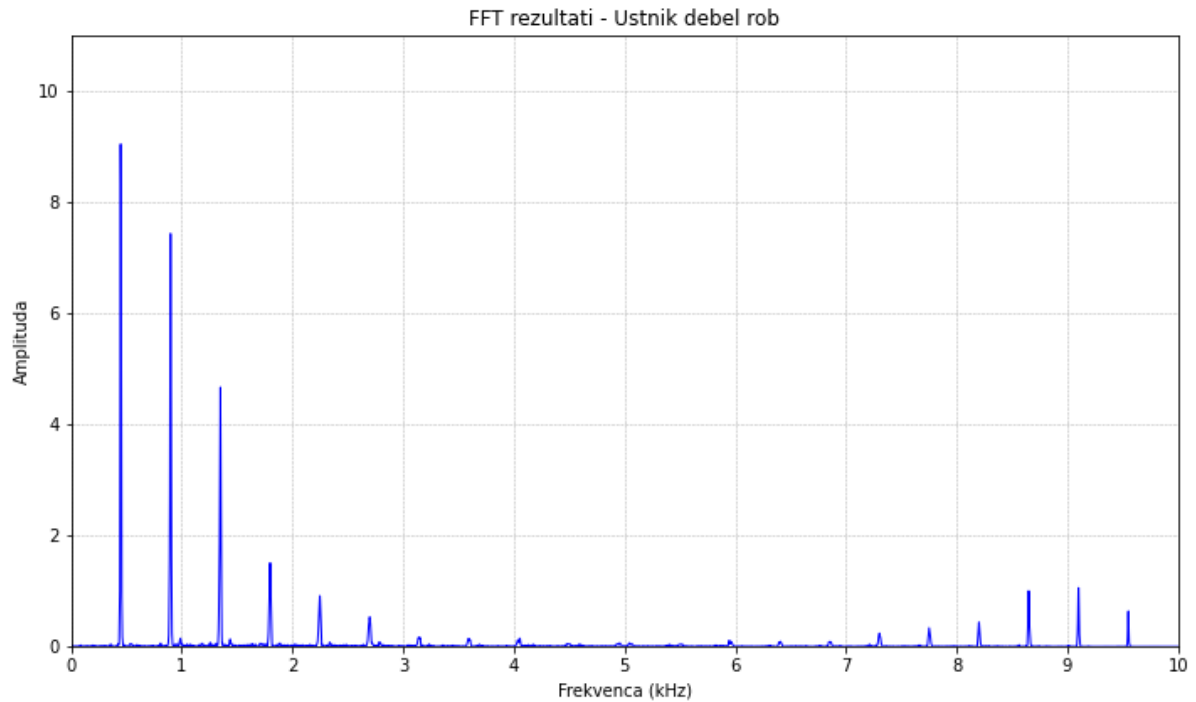
Spreminjali smo tudi debelino in rob ustnika.

Na sliki 16 je prikazana porazdelitev frekvenc pri ustniku s tankim robom. Pri tem ustniku je podobna kot pri ustniku z globoko skodelico, saj je volumen resonančne komore pri obeh ustnikih večji. Tudi tu imata osnovna frekvenca in prva višje harmonska frekvenca večjo intenziteto in tudi pri tem ustniku je intenziteta prve višje harmonske frekvence večja od osnovne. Intenziteta naslednjih treh višjih harmonskih frekvenc nato pada. Ustnik s tankim robom ima v primerjavi z ustnikom Yamaha 11B4 manjši razpon harmonski frekvenc in ima bolj prazno barvo. Če primerjamo intenziteto višje harmonskih frekvenc, ugotovimo, da ima ta ustnik temnejšo barvo.



Slika 16: Rezultati FFT za ustnik s tankim robom

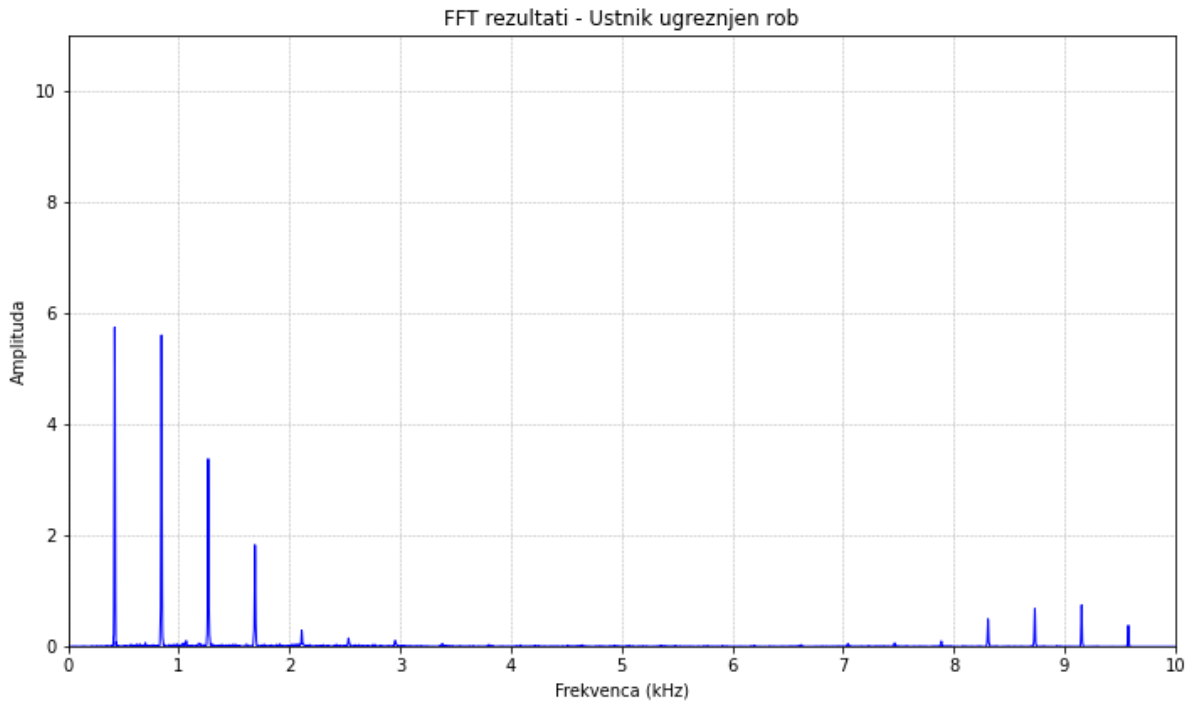
Na sliki 17 je prikazano, da intenziteta od osnovne frekvence naprej pada, naraščati pa začne šele po 6 kHz. Največjo intenziteto ima tako osnovna frekvenca, nato pa začne intenziteta padati, pri ustniku Yamaha 11B4 pa so osnovna frekvenca in naslednji dve višji harmonski frekvenci po intenziteti približno enake, šele nato pa začnejo padati. Tudi pri ustniku s plitvo skodelico frekvence po intenziteti padajo, le da ima pri ustniku z debelim robom prva višje harmonska frekvenca precej večjo intenziteto, tretja pa dosti manjšo kot enake višje harmonske frekvence pri ustniku s plitvo skodelico. Ustnik s tankim robom ima večjo intenziteto višjih harmonskih frekvenc kot tisti z debelim robom, zato ima svetlejšo barvo. Ustnik z debelim robom pa ima večji spekter harmonskih frekvenc, zato ima polnejšo barvo.



Slika 17: Rezultati FFT za ustnik z debelim robom

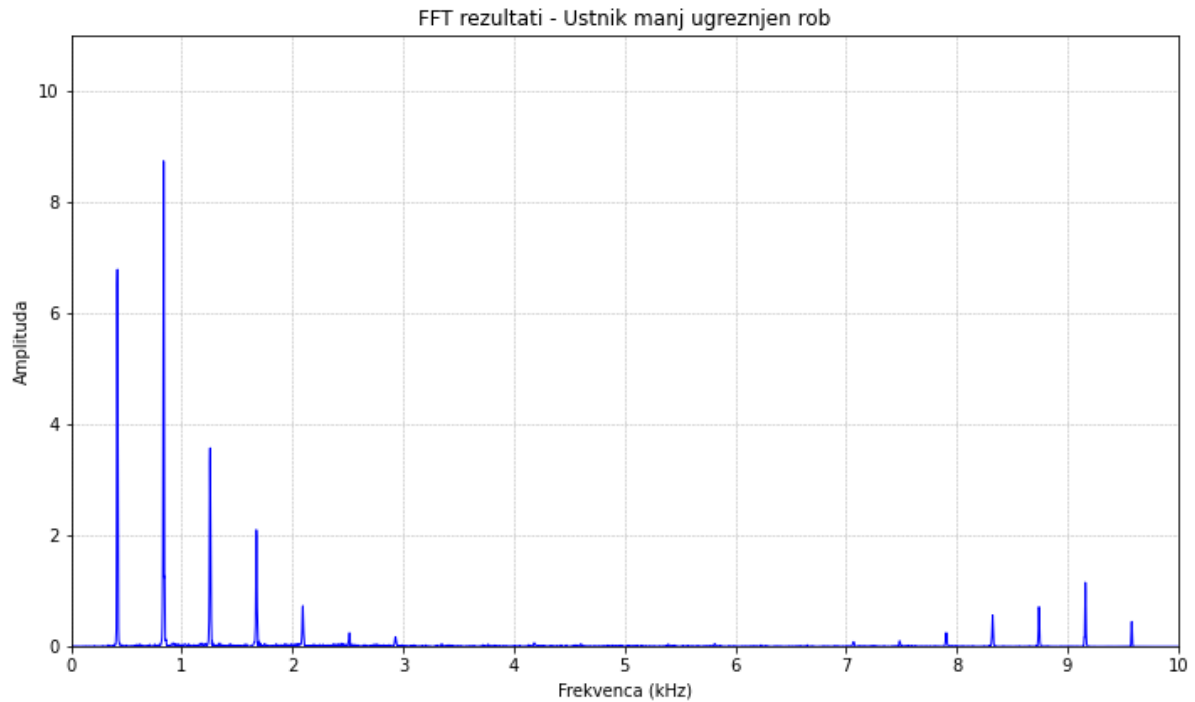
Izdelali smo ustnika z ugreznjenim robom.

Za ustnik z ugreznjenim robom lahko na sliki 18 opazimo, da je intenziteta osnovne in prve višje harmonske frekvence podobna intenziteti enakih frekvenc pri ustniku Yamaha 11B4. Druga višje harmonska frekvenca ima manjšo intenziteto kot pri ustniku Yamaha 11B4, nato pa intenzitete višje harmonskih frekvenc hitreje padejo kot pri ustniku Yamaha 11B4; pri 2 kHz je njihova intenziteta veliko manjša kot pri ustniku Yamaha 11B4.



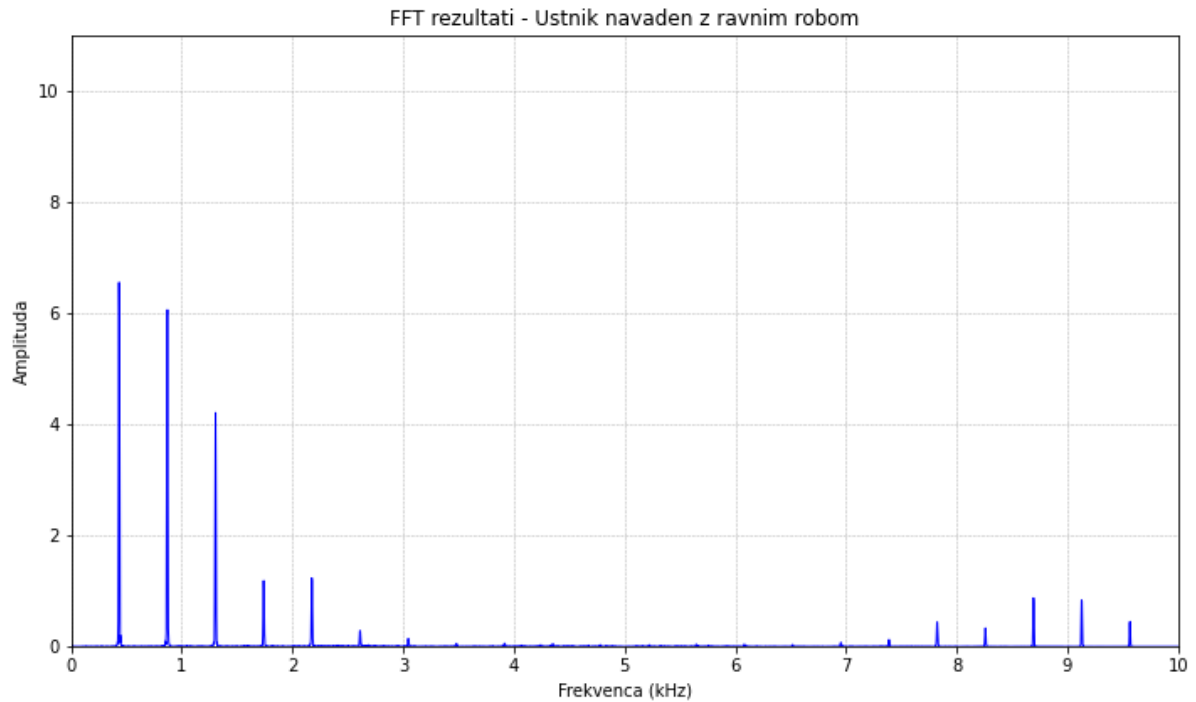
Slika 18: Rezultati FFT za ustnik z ugreznjenim robom

Na sliki 19 je prikazano, da je porazdelitev frekvenc po intenziteti podobna kot pri ustniku z ugreznjenim robom. Vendar imata osnovna in prva višja harmonska frekvenca v tem primeru večjo intenziteto kot pri ustniku z ugreznjenim robom. Ustnik z manj ugreznjenim robom ima svetlejšo barvo kot tisti z ugreznjenim robom, saj je intenziteta višjih harmonskih frekvenc pri ustniku z manj ugreznjenim robom večja. V primerjavi z navadnim ustnikom in ustnikom Yamaha 11B4 pa imata oba z ugreznjenim robom bolj prazno barvo, saj je njun razpon višjih harmonskih frekvenc manjši.



Slika 19: Rezultati FFT za ustnik z manj ugreznjenim robom

Navaden ustnik z ravnim robom ima enake mere parametrov kot navaden ustnik, le da slednji nima ukrivljenega roba. Na sliki 20 je prikazano, da pri tem ustniku osnovne frekvence in naslednji dve višji harmonski frekvenci po intenziteti padajo, pri ustniku Yamaha 11B4 so bile približno enake, pri navadnem pa so naraščale. Naslednje višje harmonske frekvence imajo nižjo intenziteto kot pri ustniku Yamaha 11B4 in pri navadnem. V primerjavi z navadnim ima ta ustnik manjši razpon harmonskih frekvenc, zato ima bolj prazno barvo. Ker je intenziteta višjih harmonskih frekvenc manjša kot pri navadnem ustniku, ima ta ustnik temnejšo barvo.



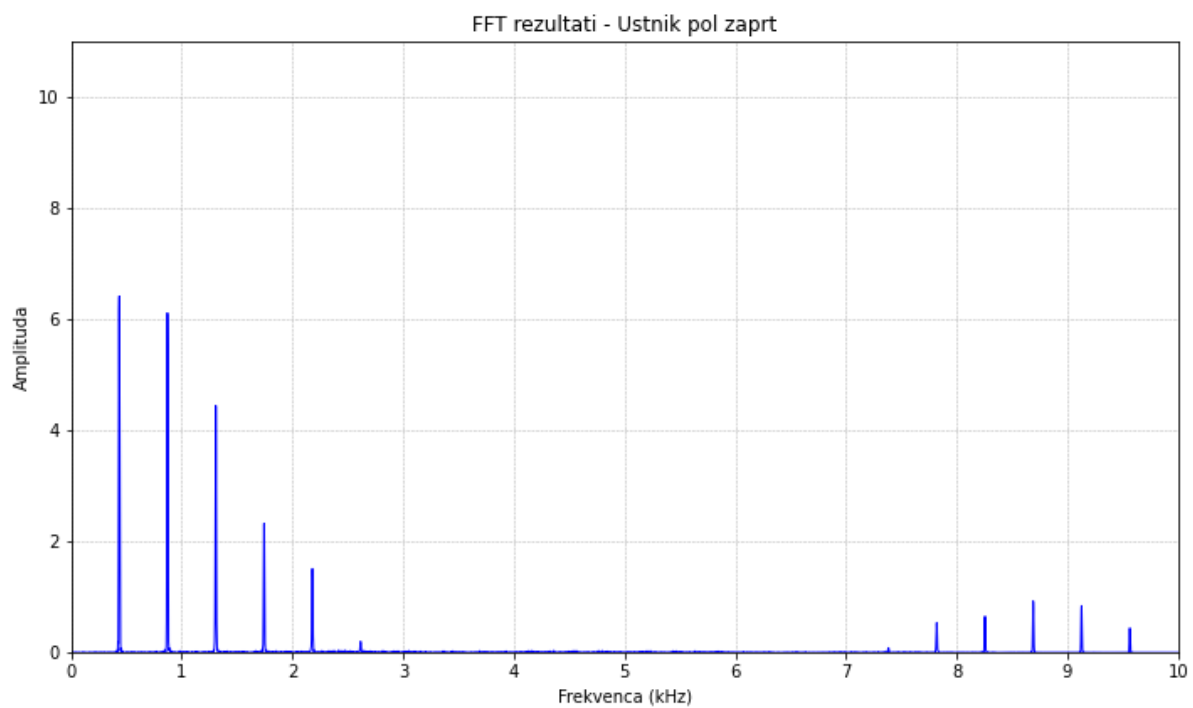
Slika 20: Rezultati FFT za navaden ustni z ravnim robom

3.5 Pol zaprt ustnik

Pol zaprt ustnik je tisti, ki ima polovico skodelice zaprte.

Na sliki 21 je pri pol zaprtem ustniku porazdelitev osnovne in prve višje harmonske frekvence približno enaka (tako kot pri ustniku Yamaha 11B4), intenziteta naslednjih štirih višje harmonskih frekvenc pa pada. Temu ustniku je intenziteta višjih harmonskih frekvenc hitreje padla kot ustniku Yamaha 11B4. Ker ima hkrati tudi nekoliko manjši harmonski razpon kot navaden ustnik, ima bolj prazno barvo. Intenziteta pri višjih harmonskih frekvencah pa pove, da ima navaden ustnik večjo intenziteto pri višjih harmonskih frekvencah, zato ima pol zaprt ustnik temnejšo barvo.

Vpliv oblike ustnika na zvok trobente



Slika 21: Rezultati FFT za pol zaprt ustnik

4 ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo z meritvami in uporabo Fourierjeve transformacije dokazali nekatere lastnosti zvoka trobente pri uporabi različnih ustnikov. Izdelali smo devet ustnikov, s katerimi smo ugotovili, kako s spreminjanjem parametrov na ustniku vplivamo na zvok in zven glasbila.

S pomočjo frekvenčnih diagramov smo ovrgli dve hipotezi, prvo s tem, ko smo ugotovili, da ima s krajšanjem debela ustnika trobenta temnejšo barvo in ne svetlejšo, tretjo pa z ugotovitvijo, da je imela trobenta pri ustniku s tanjšim robom svetlejšo barvo kot pri tistem z debelejšim.

Med raziskovanjem sem razširila svoje znanje fizike, predvsem na področju zvoka. Spoznala sem tudi sestavne dele in lastnosti ustnikov, ki jih prej nisem poznala tako podrobno oz. jim nisem posvečala toliko pozornosti. Izvedela sem, kako lahko z obliko ustnikov spreminjamo zvok pri trobenti.

Z raziskovanjem bi lahko nadaljevala tako, da bi usposobila samodejna usta za igranje, kar bi me morda pripeljalo do natančnejših rezultatov. Raziskovalno zanimive bi bile tudi ugotovitve, do katerih bi prišli, če bi ustnikom spremenili še druge parametre, npr. debelino, stene debela ali njegovo širino.

5 VIRI

Adlešič, M. (1964). Svet zvoka in glasbe: 1123 slik, 109 razpredelnic, 48 notnih vzgledov in 1 priloga. Mladinska knjiga

Conn-Selmer, Inc.. (2016). Bach Mouthpiece Manual

<https://issuu.com/conn-selmerinc/docs/av2ba901>

Farkas, P. (1992). Trobila umetnost igranja. Državna založba Slovenije d. d.

Gonzalez Y. in Prati R. (2022). Acoustic Descriptors for Characterization of Musical Timbre Using the Fast Fourier Transform. Electronics. 11. 1405.
10.3390/electronics11091405.

Halliday, D., Resnick, R., in Walker, J. (2013). Fundamentals of physics.
John Wiley & Sons.

Jannereth, E. in Esch, L. (2021). Analyzing Timbres of Various Musical Instruments Using FFT and Spectral Analysis. Journal of Student Research, 10(1).
<https://doi.org/10.47611/jsrhs.v10i1.1292>

Kladnik, R in Kodba S. (2016). *ENERGIJA, TOPLOTA, NIHANJE IN VALOVANJE; Učbenika za fiziko za gimnazije in srednje šole 2*. Ljubljana: DZS

Mohorič, A. in Babič, V. (2013). *Fizika 2; Učbenik za fiziko v 2. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol*. Ljubljana: Mladinska knjiga

Strnad, J. (2004). *Mala fizika 2, elektrika, nihanje, valovanje, optika, posebna teorija relativnosti, kvantna mehanika*. Ljubljana: DZS

Wilcox, F. F. (1957). *An investigation of certain properties of selected materials for trumpet moutpieces*. Northwestern University

<https://www.proquest.com/openview/30426b9962f2be013bb92819a1fa6eb0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>