

GIMNAZIJA ŠENTVID
LJUBLJANA

ANALIZA SPEKTRA ZVOKA GLASBENIH INŠTRUMENTOV

RAZISKOVALNA NALOGA IZ FIZIKE

AVTORJI:

Simon Premk, 2.b

Jaka Torkar, 2.b

Samo Trošt, 2.b

MENTOR:

Goran Mitrović, prof.

Ljubljana, 2022/2023

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE.....	2
KAZALO SLIK.....	3
POVZETEK.....	4
ABSTRACT.....	4
UVOD.....	4
TEORETIČNI DEL.....	7
ZVOK.....	7
ZGRADBA IN DELOVANJE ČLOVEŠKEGA UŠESA.....	8
NASTANEK STOJEČIH VALOV.....	9
TRANSVENZALNO IN LONGITUDINALNO STOJEČE VALOVANJE.....	9
LASTNA NIHANJA IN LASTNE FREKVENCE STOJEČIH VALOV.....	11
LASTNA NIHANJA VPETE STRUNE.....	11
LASTNA NIHANJA ZRAKA V PIŠČALIH.....	12
SPEKTER ZVOKA.....	14
ANALIZA SPEKTRA ZVOKA.....	15
FOURIERJEVA TRANSFORMACIJA.....	15
SPEKTER ZVOKA GLASBENIH INŠTRUMENTOV.....	17
KORDOFONI.....	17
AEROFONI.....	18
NASTANEK IN PRENOS ZVOKA PRI KITARI.....	19
KLASIČNA KITARA.....	20
UGLASITEV KLARINETA IN KITARE.....	21
EKSPERIMENTALNI DEL.....	23
MERILNI SISTEM VERNIER IN PROGRAM LoggerPro.....	23
OPAZOVANJE ZVOČNIH SIGNALOV Z OSCIOSKOPOM.....	25
MERITVE SPEKTRA RAZLIČNIH ZVOČNIH SIGNALOV.....	26
SPEKTER TONA FUNKCIJSKEGA GENERATORJA.....	26
SPEKTER TONA GLASBENIH VILIC IN RESONATORJA.....	27
SPEKTER ZVENA PANOVE PIŠČALI.....	27
ANALIZA SPEKTRA SAMOGLASNIKOV.....	28
MERITVE SPEKTRA FLAVTE IN KLARINETA.....	31
MERITVE SPEKTRA KLASIČNE KITARE.....	33
RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK.....	40
VIRI IN LITERATURA.....	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Potujoči zvočni val.....	7
Slika 2: Zgradba ušesa	8
Slika 3: Nastanek transversalnih stoječih valov na struni	10
Slika 4: Grafični prikaz odmika in tlaka stoječih zvočnih valov v polodprti piščali	11
Slika 5: Lastna nihanja vpete strune.....	12
Slika 6: Stoječi zvočni val v polodprti piščali (klarinet)	13
Slika 7: Stoječi zvočni val v odprti piščali (flavta)	13
Slika 8: Časovni prikaz odvisnosti tlaka pri samoglasniku a	14
Slika 9: Spekter tona, zvena in šuma	15
Slika 10: Prikaz seštevanja sinusnih funkcij s programom Geogebra.....	16
Slika 11: Spektralna analiza zvoka električnega klavirja Yamaha	17
Slika 12: Frekvenčni spekter flavte in violine	18
Slika 13: Zgradba in sestavni deli kitare	19
Slika 14: Klasična kitara Šali.....	21
Slika 15: Vmesnik LabQuest.....	23
Slika 16: Kondenzatorski mikrofonski iz zbirke Vernier.....	24
Slika 17:: Opazovanje zvočnih signalov z osciloskopom.....	25
Slika 18:: Opazovanje zvočnih signalov z osciloskopom.....	25
Slika 19: Analiza sinusnega signala funkcijskega generatorja	26
Slika 20: Spekter zvoka glasbenih vilic z resonatorjem	27
Slika 21: Merjenje spektra zvoka Panove piščali	28
Slika 22: Simon i.....	29
Slika 23: Spektri samoglasnika i.....	30
Slika 24: Flavta B tiho	31
Slika 25: Flavta B.....	31
Slika 26: Ustnik klarineta	32
Slika 27: Klarinet.....	32
Slika 28: Klarinet C.....	32
Slika 29: Klarinet C tiho.....	33
Slika 30: Primerjava Šali-Breuer	34
Slika 31: Primerjava Šali.Breuer 5 struna	35
Slika 32: Primerjava Šali-Breuer 6. struna	36
Slika 33: Hotko E na 5. struni.....	37
Slika 34: Šali E vibrato na 4. struni.....	38
Slika 35: Šali E vibrato na 5.struni	39
Slika 36 : Primerjava spektrov ob postavitvah desne roke.....	40

POVZETEK

Vrhunski glasbeniki ustvarjajo izjemne zvoke. Človeka preseneti, kako lepo se da igrati na različne inštrumente. Zanimalo nas je, ali lahko razlike v zvoku, ki jih opisujemo s pridevniki topel, oster, mehak ali pa temačen zvok, tudi dokažemo z uporabo fizikalnih metod in elektronskih merilnikov. V ta namen smo uporabili razpoložljivo šolsko opremo Vernier.

Opazovali in izmerili smo frekvenčni spekter zvočnega funkcijskega generatorja, glasbenih vilic z resonatorjem in Panove piščali. Opazovali smo spektre zvena različnih samoglasnikov in ugotavljali podobnosti in razlike med njimi in nami. Raziskovali smo razlike med tonom, ki človeškim ušesom zveni mehak ter ostrim in neprijetnim tonom. Primerjali smo spektre flavte in klarineta in preverili kako se meritve ujemajo s teoretičnimi modeli, ki v približku opisujejo stoječe zvočno valovanje, ki ga v njih vzbudimo.

Težišče raziskovanja je bilo posvečeno analizi zvočnih spektrov, ki jih oddajajo različne kitare. Preučili smo spektre zvoka petih različnih kitar in izvajali različne variacije tonov. Svet frekvenčnih spektrov in subjektivno zaznavanje zvoka smo povezali s fiziko.

ABSTRACT

Top musicians create exceptional sounds. One is surprised by how beautifully different instruments can be played. We wanted to find out if the differences in sound usually described with the adjectives warm, sharp, soft or dark could also be demonstrated using physical methods and electronic meters. For this purpose, we have used available Vernier school equipment.

We observed and measured the frequency spectrum of an acoustic function generator, a musical fork with resonator and a Pan flute. We observed the sound spectra of different vowels and identified similarities and differences between them and us. We explored the differences between a tone that sounds soft to human ears and a high-pitched and unpleasant tone. We compared the spectra of the flute and the clarinet and checked how the measurements fit the theoretical models that describe, as an approximation, the standing sound waves that are aroused in them.

The main research focus was on analysing the sound spectra emitted by different guitars. The sound spectra of five different guitars were examined and different tone variations were performed. The world of frequency spectra and the subjective perception of sound was linked to physics.

UVOD

Akustika je veja fizike, ki se ukvarja s proučevanjem zvoka. Raziskuje, kako se zvok razširja in prenaša energijo skozi prostor. Znanstveniki so razvili metode raziskovanja, merilne naprave in načine analiziranja raznovrstnih zvočnih oblik in pojavov.

Znanstveno proučevanje zvoka, ki temelji na teoretičnih in matematičnih osnovah, se je razvilo v drugi polovici 19. stoletja. Znanstveniki, kot sta bila Hermann von Helmholtz in Lord Rayleigh, so postopno razvili metode in naprave, s katerimi so lahko natančneje analizirali zvok. Uporaba matematičnih metod, kot je na primer analiza spektra s Fourierovo transformacijo, je omogočala natančnejšo spektralno analizo različnih zvočnih signalov in omogočala poglobljeno razumevanje zaznavanja zvoka.

Poseben del akustike se ukvarja z načini zaznavanja zvoka pri človeku. Človeško uho zaznava frekvence zvoka z različno občutljivostjo, največja je pri frekvencah okoli 3000 Hz. Zaznavanje zvoka je odvisno od vsakega posameznika in zato subjektivno na primer, zvok, ki ga oddajajo glasbeni instrumenti, opisujemo s pridevniki, kot so: mehak, topel, globok, temačen, oster, svetel in še z mnogimi drugimi. Z besedami ni lahko opisati vseh barvitosti zvoka, spektralna analiza pa razkrije nekatere podrobnosti o zastopanosti frekvenc v zvočnem signalu.

Oblike zvočnih valov so različne, od najpreprostejših, ki vsebujejo le eno frekvenco in imajo obliko sinusnega signala, do kompleksnih, na primer pri glasbenih instrumentih. Naše uho z lahkoto loči dva različna tona enakih frekvenc, ki ju ustvarita violina ali pa flavta. Loči tudi isti ton, ustvarjen na istem instrumentu, ki je odigran na različen način. Zvok, ki ga oddaja odlična kitara, se razlikuje od zvoka slabe kitare, kvaliteta je odvisna tudi od načina ubiranja strun in seveda od samega izvajalca. Zanimalo nas je, do kakšne mere lahko s spektralno analizo dokažemo te razlike v zaznavanju. Pri kitari smo v naših poskusih uporabili različne udarce po strunah. Zanimale so nas tudi različne postavitve desne roke glede na vrat in kobilico. Raziskovali smo, kaj pomenita mehak in oster ton in kako se te lastnosti zvoka pokažejo v njegovem spektru. Različne grafe na istih tonih smo poskušali ustvariti tudi z vibratom, ki je dodajanje rahlega nihanja strune, ustvarjenega z gibanjem pritisnjenih prstov na levi roki.

Najbolj pa nas je zanimalo, kako so energije, ki so usmerjene v določeno frekvenco, povezane z zvenenjem različnih kitar. Primerjali smo med dobrimi in slabimi kitarami. Pri klarinetu in flavti nas je zanimalo ustvarjenje frekvenc stoječega valovanja, kot primerjavo med lihimi večkratniki pri klarinetu in vsemi večkratniki pri flavti. Zanimale so nas frekvence, pri igranju enako zvonečega tona pri flavti in klarinetu ter njihova primerjava.

Hipoteze

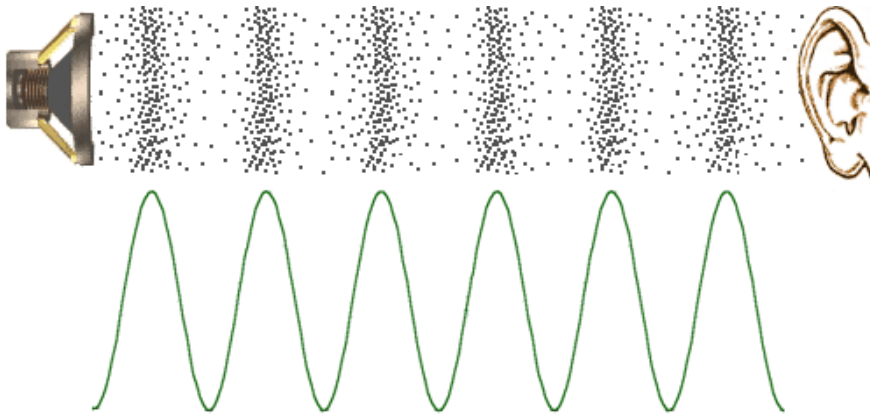
1. Boljše kitare imajo več energije usmerjene v osnovno frekvenco, medtem ko bo pri slabših kitarah večina te energije razporejena po večkratnikih osnovne frekvence.
2. Pri klarinetu se bodo frekvence ojačano pojavljale na lihih večkratnikih osnovne frekvence, pri flavti bodo te frekvence vidne na vseh večkratnikih.
3. Frekvenčni spekter kitare je neodvisen od vibrata in postavitve desne roke.

TEORETIČNI DEL

ZVOK

Zvok je primer mehanskega valovanja, ki se razširja skozi plin, kapljevino ali trdno snov. Na mestu izvira zvoka nastane motnja, ki se razširi v prostor in s seboj nosi zvočno energijo.

Zvok je primer longitudinalnega valovanja, kar pomeni, da delci nihajo v smeri razširjanja valovanja. V snovi, po kateri se zvok razširja, nastajajo zgoščine in razredčine. V zgoščinah se zaradi povečane koncentracije delcev v nekem trenutku povečata tlak in gostota, v razredčinah pa zmanjšata.



Slika 1: Potujoči zvočni val

Hitrost, s katero se širi zvok skozi medij, je odvisna od snovi in njene gostote. V zraku se zvok pri sobni temperaturi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ širi s hitrostjo približno 340 m/s . Hitrost zvoka v zraku je odvisna od temperature in gostote.

V kapljevinah in trdnih snoveh se zvok razširja z večjo hitrostjo, v vodi približno 1500 m/s , v trdnih snoveh pa nekaj kilometrov na sekundo.

Zvoku lahko pripišemo različne fizikalne količine. Ko ga opisujemo, navedemo njegovo frekvenco, zvočno moč, gostoto energijskega toka, glasnost in spekter zvoka. Frekvenca je povezana z višino zvoka, ki jo zaznava človeško uho, glasnost pa s količino energije, ki v izbranem času zadene površino bobniča. Glasnost zvoka je povezana z amplitudo zvočnega tlaka, oziroma z amplitudo nihanja delcev v zvočnem valu.

Človeško uho zaznava frekvence med 20 Hz in 20 000 Hz . Ta frekvenčni interval predstavlja slušno območje človeka. Frekvenc izven tega intervala ne slišimo.

Frekvence nižje od 20 Hz predstavljajo infrazvok, višje od 20 kHz pa ultrazvok. Človeško uho je najbolj občutljivo za frekvence med 2500 Hz in 3000 Hz.

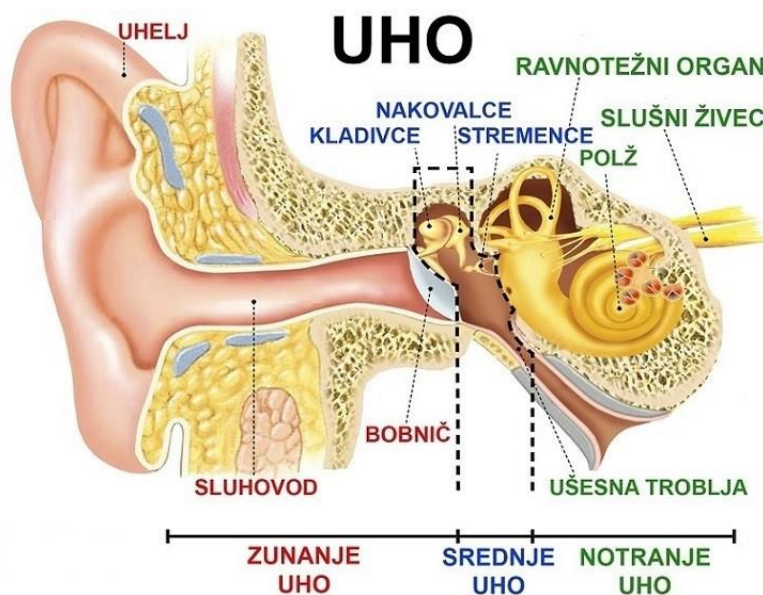
Poznamo več vrst zvoka in sicer ton, zven in šum. Ton sestavlja le ena frekvenca, medtem ko zven sestavlja več sinusnih valovanj z več različnimi frekvencami, ki so navadno osnovni in višji harmonični toni. Za te je značilno, da so večkratniki frekvence osnovne tona. Šum pa je zvok, v katerem so prisotne vse sinusne sestavine v nekem frekvenčnem valovanju.

Zvok in z njim povezane pojave preučuje akustika, subjektivno človeško zaznavanje pa psiho-akustika.

ZGRADBA IN DELOVANJE ČLOVEŠKEGA UŠESA

Uho je organ, ki je zaslužen za našo zaznavo zvokov iz okolja. Ima pa uho tudi funkcijo ravnotežnega centra. Torej je uho sestavljeno iz slušnega in ravnotežnega dela. Uho je prvi organ, ki se razvije v našem življenju. Omogoča nam na primer zaznavo bitja materinega srca, ko smo še v trebuhu. Torej je uho eden najpomembnejših organov za povezanost z drugimi ljudmi.

Uho je sestavljeno iz treh različnih delov. Deli se na zunanje, srednje in notranje uho. V zunanjem ušesu so uhelj, sluhovod in bobnič. Srednje uho sestavljajo bobnična votlina, napolnjena z zrakom in v njej tri najbolj poznane ušesne kosti, to so kladivce, stremence in nakovalce. Notranje uho pa je del, v katerem je prisoten, poleg ušesne troblje, polža in slušnega živca, tudi ravnotežni organ.



Slika 2: Zgradba ušesa

Uhelj ima funkcijo zbiratelja energije zvočnih valov, ki jih usmeri v notranjost ušesa. Zvok potuje po sluhovodu, ki deluje na principu na eni strani zaprte cevi, podobno kot pri orglah. Ko zvočni valovi potujejo, se od zaprtega dela odbijejo in vračajo po isti poti, kjer trčijo ob nove valove. Pri tem se ojačajo nekatere frekvence, ki so pri človeku pogoste in najbolj frekvence v območju človeškega govora. To ojačenje je lahko kar do 10-kratno.

Ko valovanje trči v bobnič, se ob tem pretvarja v mehansko delovanje treh malih koščic v srednjem ušesu. Koščice pa energijo valovanja zvoka pretvarjajo v energijo valovanja ušesne tekočine v polžu. Delovanje ušesnih koščic pa je na principu vzvodov. Imajo različen hod, to pa povzroča še večji pritiska na ušesno tekočino. Sila se v sistemu od tiste iz bobniča na kladivce ojača kar za 2-3 krat. Ker ima bobnič veliko večjo površino kot ovalno okence na začetku notranjega ušesa se sila tudi tu ojača in to približno 30-krat. Na ušesne koščice pa so pripete tudi mišice, ki uravnavajo glasnost prihajajočih zvokov. Zaradi celotnega sistema, se sila ojača do 800-krat, preden trči ob ušesno tekočino.

Mehanska sila se pretvori v hidravlično silo v polžu, ki je sestavljen iz treh prekatov, ki so ločeni z membranami. Če začne katera koli od membran puščati, so vidne precejšnje okvare sluha. Na eni izmed membran, bazilarni membrani, leži skupek celic, ki se po svojem odkritelju imenujejo Cortijev organ. Sestavljen je iz štirih vrst celic dlačnic, ki so ključne za zaznavanje zvoka. Notranje dlačnice zaznavajo zvok in pošiljajo signale v slušni živec, ki posreduje informacije možganom. Zunanje dlačnice pa predvsem sprejemajo signale iz možganov. Iz polža vodi preko slušnega živca v možgane trideset tisoč živčnih vlaken, povezanih v skupine glede na frekvenco zvoka, katerega signal prenašajo. Možgani zaznajo frekvenco glede na to, kje je vlakno, po katerem je prišel signal, ter glasnost zvoka po številu sosednjih vlaken, ki so vzdružena.

NASTANEK STOJEČIH VALOV

TRANSVENZALNO IN LONGITUDINALNO STOJEČE VALOVANJE

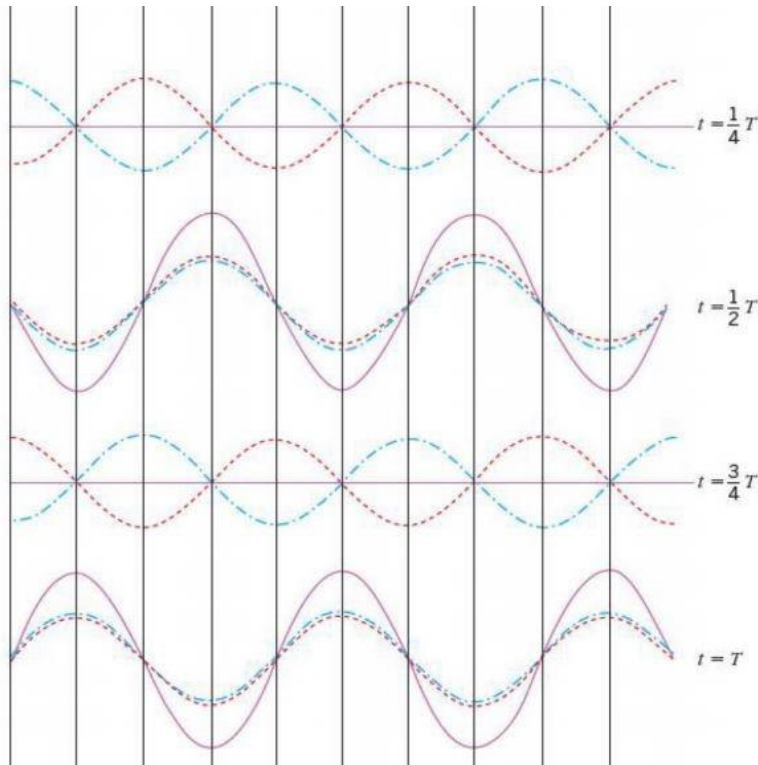
Potujoče valovanje, ki potuje skozi prostor, se na oviri odbije. Odvisno od robnih pogojev se odbije z enako ali z nasprotno fazo. Ko se vpadni in odbiti val srečata, lahko ustvarita posebno obliko valovanja, ki mu pravimo stoječe valovanje. Pravimo, da valovanji interferirata.

Takšno valovanje lahko nastane le ob natančno določenih resonančnih pogojih, na primer pri izbranih frekvencah, ki jih imenujemo lastne frekvence.

Transverzalne stoječe valove lahko opazujemo na struni, longitudinalne pa pri nihanju zraka v piščalih. Pri interferenci se sestavita dve nasprotno usmerjeni potujoči valovanji z enakima amplitudama in enako frekvenco.

Ko opazujemo stoječe valove na struni, vidimo, da nekatere točke mirujejo, nekatere

pa nihajo z največjo amplitudo. Kjer val ne niha, se ustvari vozle, kjer je amplituda valovanja največja, pa nastanejo hrbti. Vsi delci strune nihajo z enako frekvenco, vendar z različnimi amplitudami. Razdalja med sosednjima vozlioma je enaka polovici valovne dolžine. S spreminjanjem resonančnih pogojev lahko ustvarimo različna lastna nihanja, ki imajo pripadajoče lastne frekvence.



Slika 3: Nastanek transverzalnih stoječih valov na struni

Resonančne pogoje lahko spreminjamo tako, da struno bolj ali manj napnemo. Ta način uporabljamo pri uglasovanju glasbenih instrumentov, na primer pri godalih in brenkalih. Po struni, ki je napeta z večjo silo, se valovanje širi hitreje in obratno. Hitrost valovanja na struni je odvisna tudi od dolžinske gostote mase, ki pove, kolikšna je masa strune na enoto dolžine. S povečevanjem dolžinske gostote mase upočasnjujemo hitrost valovanja, saj ima struna pri tem večjo vztrajnost. Hitrost transverzalnega zvočnega valovanja na struni izračunamo z enačbo

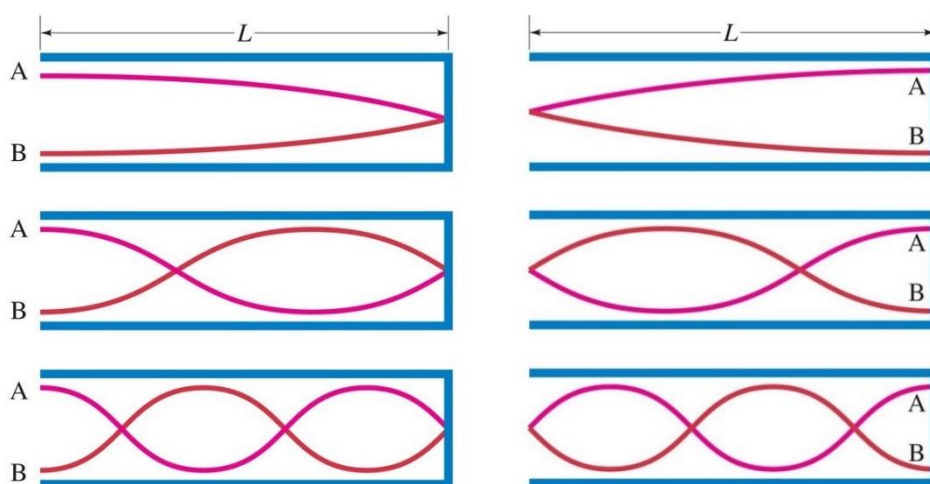
$$c = \sqrt{F/\mu}$$

kjer je $\mu = m/l$ dolžinska gostota mase.

Transverzalno valovanje je lastnost strunskih inštrumentov, inštrumentov s plastično opno in inštrumentov z elastično leseno ali kovinsko ploščico. Pri prečnem ali transverzalnem valovanju je gibanje delcev pravokotno na smer širjenja valov.

Vzdolžno ali longitudinalno valovanje je valovanje, pri katerem se delci premikajo v smeri valovanja. To je tudi valovanje zgoščin in razredčin. Vzdlžno valovanje deluje s spremembami v tlakih ali tlačnimi sunki. Nastane v prožni snovi.

Stoječi zvočni valovi se pojavijo v piščali, ko v njej vzbudimo valovanje. Takšno valovanje ponazorimo tako, da prikažemo amplitude nihanja delcev vzdolž piščali oziroma amplitude nihanja tlaka. Tam, kjer delci nihajo z največjo amplitudo, je hrbet, kjer pa je amplituda nihanja delcev enaka 0, pa je vozle valovanja. Kjer se delci zgoščijo, je hrbet tlaka, vozle tlaka pa je tam, kjer je tlak stalno enak normalnemu atmosferskemu tlaku.



Slika 4: Grafični prikaz odmika in tlaka stojećih zvočnih valov v polodprti piščali

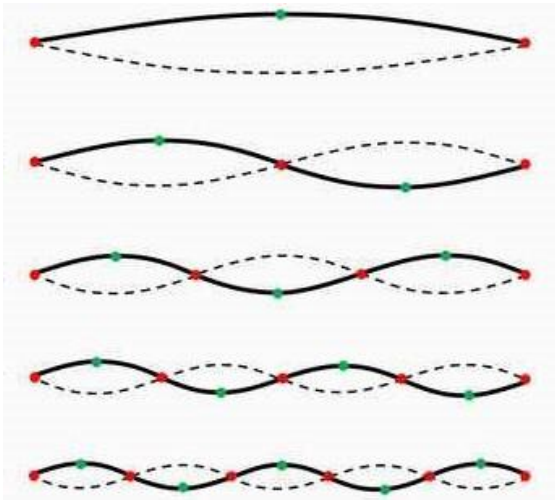
Poznavanje zakonitosti stojećih valov nam omogoča razumevanje nastanka zvoka glasbenih instrumentov. Transverzalni stojećí valovi se vzpostavijo na strunah godal in brenkal, se prenesejo na telo instrumenta in zanihajo zrak v notranjosti instrumenta in v njegovi okolici. Valovi potujejo proti sprejemnikom zvoka, npr. našemu ušesu in izzovejo občutek zvoka. Pri pihalih niha zrak v notranjosti teh instrumentov, ki si jih v grobem lahko zamislimo kot cevi, v katerih nastaja stojećé zvočno valovanje.

LASTNA NIHANJA IN LASTNE FREKVENCE STOJEČIH VALOV

LASTNA NIHANJA VPETE STRUNE

Struna z dolžino L in maso m je vpeta na obeh krajiščih. Ko na struni vzbujamo valovanje s frekvenco ν , se to s hitrostjo c razširi po njej. Valovanje se na drugem krajišču odbije z nasprotno fazo in interferira z vpadnim valovanjem. Pri natanko

izbranih frekvencah se na struni vzpostavijo tako imenovana lastna nihanja. Nihanje z najnižjo frekvenco imenujemo osnovno lastno nihanje, nihanja višjih frekvenc pa višje harmonska lastna nihanja.



Slika 5: Lastna nihanja vpete strune

Pri izpeljavi lastnih frekvenc upoštevamo, da je razdalja med sosednjima vozlova enaka polovici valovne dolžine in uporabimo enačbo, ki povezuje hitrost valovanja, frekvenco in valovno dolžino. Tako dobimo, da je osnovna lastna frekvenca strune enaka $v_0 = c/2L$. Hitrost, s katero se širi valovanje na struni, je odvisna od sile, s katero je struna napeta, in dolžinske gostote mase. Višje harmonske lastne frekvence so mnogokratniki osnovne.

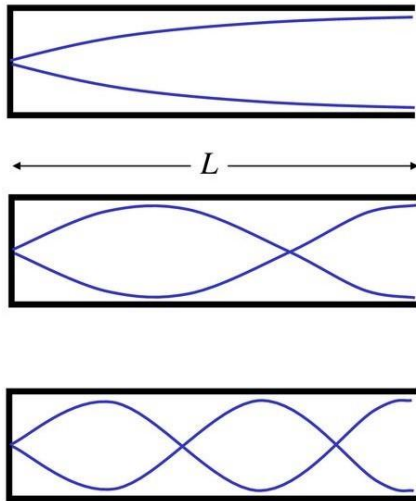
Če je eno krajišče strune vpeto, drugo pa prosto, se lastne frekvence razlikujejo, izračunamo pa jih po enakem postopku.

LASTNA NIHANJA ZRAKA V PIŠČALIH

V piščalih nastanejo stoječa longitudinalna valovanja nihanja zraka. Piščal je lahko zaprta na obeh krajiščih, lahko je na obeh krajiščih odprta, ali pa je polodprta. Lastna nihanja polodprte piščali imajo obliko, kot jo prikazuje slika. V hrbtih valovanja so amplitude nihanja delcev zraka največje in se zmanjšujejo, ko se približujemo vozlu. Porazdelitev tlaka je ravno nasprotna, tlak niha z največjo amplitudo v točkah, kjer so vozli odmika. Primer takega instrumenta je klarinet.

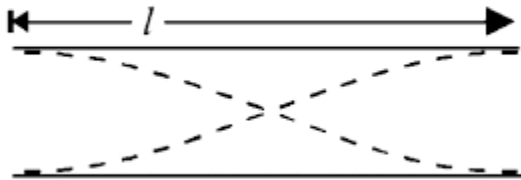
Osnovna lastna frekvenca je enaka $v_0 = c/4L$, kjer je c hitrost zvoka v zraku in L dolžina piščali. Hitrost zvoka delimo s $4L$, ker je pri osnovni frekvenci ustvarjena le $1/4$ vala.

Višje harmonske frekvence so enake lihim mnogokratnikom osnovne.



Slika 6: Stojęči zvočni val v polodprti piščali (klarinet)

Če je piščal odprta na obeh koncih, primer takšne piščali je flavta, se pojavijo drugačne oblike stojęčih valov. Na krajiščih nihajo delci z največjo amplitudo, amplituda tlaka pa je enaka 0. Osnovno lastno nihanje ima obliko :

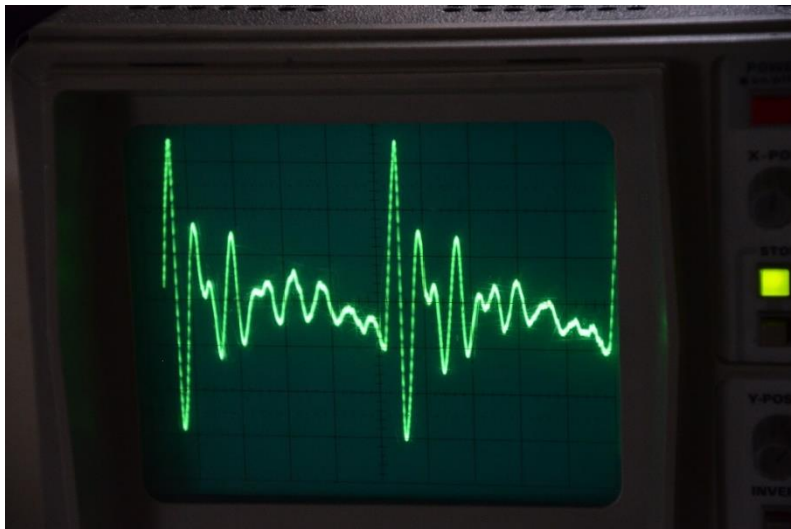


Slika 7: Stojęči zvočni val v odprti piščali (flavta)

Osnovna lastna frekvenca ν_0 odprte piščali je $\nu_0 = c/2l$, kjer je l dolžina piščali in c hitrost valovanja. Višje harmonska lastna nihanja imajo frekvence, ki so enake mnogokratniku osnovne lastne frekvence.

SPEKTER ZVOKA

Zvočni signal lahko grafično prikažemo kot časovno odvisnost zvočnega tlaka. Ta je lahko neperiodičen, velikokrat pa ima signal zelo jasno razvidno časovno periodo. Časovno spreminjanje tlaka lahko opazujemo z osciloskopom.



Slika 8: Časovni prikaz odvisnosti tlaka pri samoglasniku a

Pomembna informacija, ki jo lahko izluščimo iz zvočnega signala, je njegov spekter.

Spekter zvoka nam pove, katere frekvence so v zvočnem signalu zastopane in kolikšen je delež energije zvoka pri posamezni frekvenci. Predstavimo ga kot graf moči ali tlaka kot funkcijo frekvence. Moč ali tlak se običajno merita v decibelih, frekvenca pa v nihajih na sekundo.

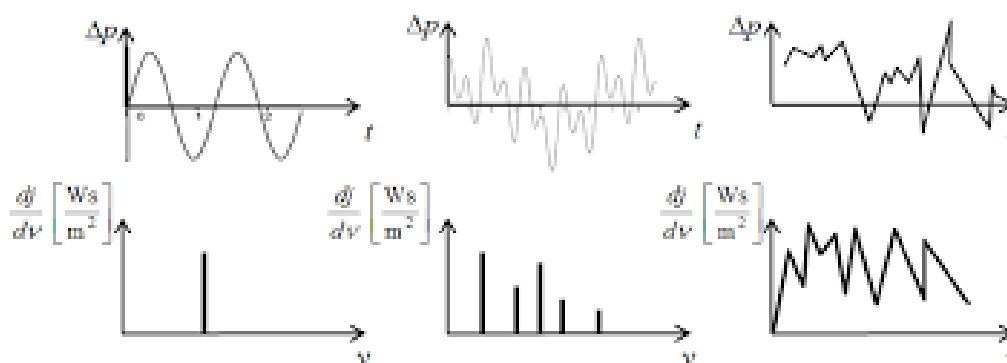
Zvočni signal lahko vsebuje eno samo frekvenco, največkrat pa je sestavljen iz različnih frekvenc. Spekter je lahko zvezen ali diskreten. Pri zveznem spektru so na danem intervalu zastopane vse frekvence, pri diskretnem pa le določene frekvence oziroma spektralne komponente.

TON, ZVEN IN ŠUM

Glede na značilni zvočni spekter ločimo med tonom, zvenom in šumom. Poznamo tudi pok, ki ima podobne lastnosti kot šum, ropot: mešanico šuma in poka.

Ton je najbolj enostavna in osnovna oblika zvoka. Je zvok, ki ga sestavlja ena sama frekvenca. Njegov spekter je črtast z eno sinusno sestavino. Valovanje, kot ga ima ton, imenujemo tudi harmonično valovanje. Nastane ob pravilnem in periodičnem nihanju delcev in z nihanjem oblikuje sinusno krivuljo. Tak primer so glasbene vilice, ki se ob mehanskem vzburljenju tresejo s frekvenco tona A1.

Zven je periodična oblika zvočnega signala, ki ga sestavlja več sinusnih sestavin z različnimi frekvencami, navadno osnovni ton in višji harmonični oziroma alikvotni toni. Frekvence alikvotnih tonov so celoštevilski večkratniki frekvence osnovnega tona. Tudi njegov spekter je črtast in ga uvrščamo med diskretne spektre. Pri izgovorjavi samoglasnikov oddajamo zvone. Barvo zvena opredeljuje razmerje med vrednostmi ravni zvočnega tlaka osnovnega in višjih harmonikov.



Slika 9: Spekter tona, zvena in šuma

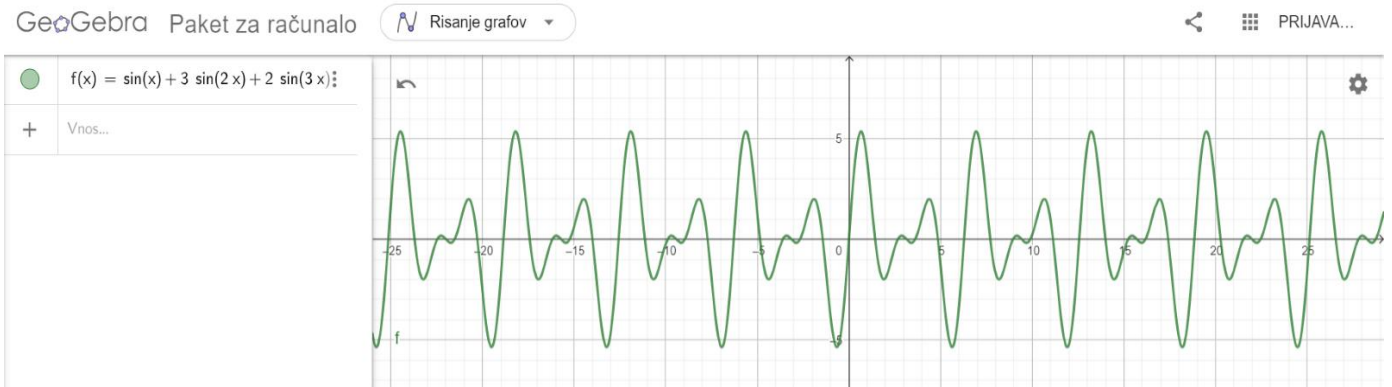
Šum je zvok, v katerem so v večji ali manjši meri navzoče vse sinusne sestavine v nekem frekvenčnem intervalu; njegov spekter je zvezen. Primer šuma so soglasniki, sestavljeni iz zelo različnih frekvenc, ki ne odgovarjajo harmonikom. Značilnost šuma je, da nima izrazitih tonov, ampak ima širok zvezni frekvenčni spekter. Nastane ob nepravilnem nihanju prožne snovi in je navadno moteč za naše uho.

ANALIZA SPEKTRA ZVOKA

FOURIEROVA TRANSFORMACIJA

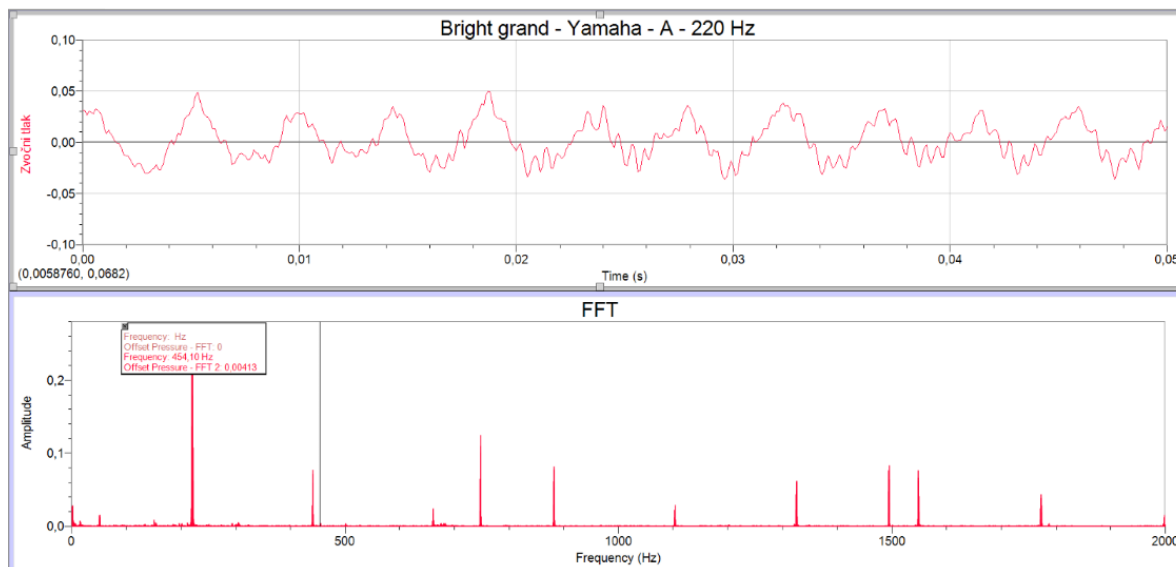
Frekvence, ki so zastopane v zvočnem signalu lahko poiščemo tako, da uporabimo posebno matematično orodje, ki ga imenujemo Fourierova analiza. Francoski matematik Joseph Fourier je pokazal, da lahko vsak periodičen signal izrazimo kot vsoto sinusnih funkcij različnih frekvenc in amplitud. Metoda razgradnje signala na osnovne sestavine je zapletena in presega srednješolsko znanje matematike, lahko

pa jo ponazorimo z uporabo programa Geogebra. Graf prikazuje primer, kjer seštevamo več sinusnih krivulj in opazujemo lastnosti takšne konstrukcije.



Slika 10: Prikaz seštevanja sinusnih funkcij s programom Geogebra

Signal, ki ga dobimo na ta način je periodičen, njegova frekvenca je enaka frekvenci osnovne funkcije $\sin x$, v našem primeru je osnovna perioda enaka 2π . Program LoggerPro, ki smo ga uporabljali pri spektralni analizi različnih zvočnih spektrov, ima vgrajeno tako imenovano hitro Fourierovo analizo FFT (Fast Fourier Transform), ki je prilagojena računalniški analizi signala. Z dovolj veliko natančnostjo lahko vsak periodičen zvočni signal, kot so na primer zveni glasbil, razstavimo na posamezne frekvence in opazujemo zvočni spekter. Ta nam pokaže razporeditve lastnih frekvenc, amplitude pa v kolikšni meri so frekvence zastopane v signalu.



Slika 11: Spektralna analiza zvoka električnega klavirja Yamaha

SPEKTER ZVOKA GLASBENIH INŠTRUMENTOV

Inštrumente akustično lahko v grobem razdelimo v tri skupine, to so kordofoni ali strunski inštrumenti, aerofoni ali zračni inštrumenti, idiofoni in membranofoni, med katerimi so skoraj vsi tolkala. Vse izmed teh skupin lahko nadaljnje razdelimo v podskupine glede na sprožilec tresljajev na inštrumentu. Tukaj smo izključili elektronske proizvajalce tonov, ki uporabljajo vakuumske cevi ter prenose.

KORDOFONI

Kordofoni so strunska glasbila. Zvok proizvajajo prek različnih udarcev po napetih strunah. Izraz kordofon izvira iz grške besede chord, ki pomeni struna. Kordofone lahko razdelimo v tri skupine, to so: godala, brenkala ter inštrumenti s tipkami. Razlikujejo se v sprožilcu tresljajev na struni. Pri brenkalih je to človeška roka, pri godalih pa konjska žima napeta na leseni lok. Pri inštrumentih s tipkami zvok ustvarjajo klavirski mehanizmi, ki udarjajo po strunah. Pri glasbilih s tipkami pa so klavirski mehanizmi še dodatno prožena preko mehanizma, ki ga glasbenik sproži s pritiskom na tipko, od koder so glasbila s tipkami dobila ime.

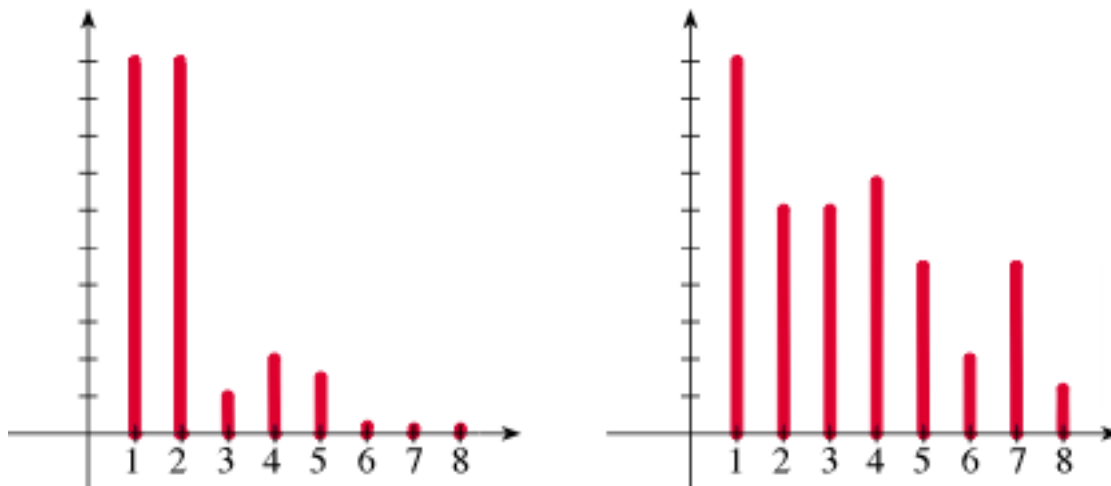
Kordofone razdelimo na enostavne in kompleksne. Značilnost enostavnih kordofonov je, da ne uporabljajo resonatorja. Kompleksni kordofoni uporabljajo resonator, kar pomeni, da za proizvodnjo zvoka uporabljajo dodaten objekt, ki vibracije strune ojača in jih prenese na zrak. Kompleksne kordofone lahko razdelimo še v dve skupini. To sta harfistična, lutnjistična skupina, ki se razlikujeta v legi strun glede na trup. Pri harfistični skupini so strune pravokotne na trup, pri lutnjistični pa so strune s trupom vzporedne.

AEROFONI

Aerofoni so skupina glasbil, ki je sestavljena iz cevi v kateri zveni zračni steber. V to skupino spadajo pihala, trobila, orgle, harmonike itd. Aerofon je glasbilo, ki proizvaja zvok s povzročanjem vibracij zračnega telesa, brez uporabe strun in membran. Aerofone lahko razdelimo v podskupine, ki so enake skupinam in instrumentom naštetim predhodno. Pihala in trobila se med seboj razlikujejo v izdihu zraka. V prvem primeru se piha, v drugem trobi. Poimenovanje je po obliki ust ob vpihovanju v glasbila. Pri pihalih različne tone dobivaš s premikanjem zaklopk, pri trobilih so različni toni pridobljeni z različno postavitvijo ventilov.

Zvoki, ki jih oddajajo različni inštrumenti se medsebojno ločijo glede na njihov spekter. Ko zaigramo ton enake frekvence na violini ali pa flavti, ju naše uho brez težav loči. Človeško uho je izjemen analizator zvočnih signalov, sposobno je zaznati količino energije pri posameznih frekvencah in to informacijo posredovati možganom. Glede na frekvenčno porazdelitev zvočne energije zvok opišemo kot mehak, oster, temačen ali pa svetel. Svetel ali pa oster zvok zaznavamo zaradi močnejše prisotnosti višje-harmonskih nihanj, če pa je večina energija nakopičena v osnovni in nižjih frekvencah, pa je občutek zvoka mehkejši.

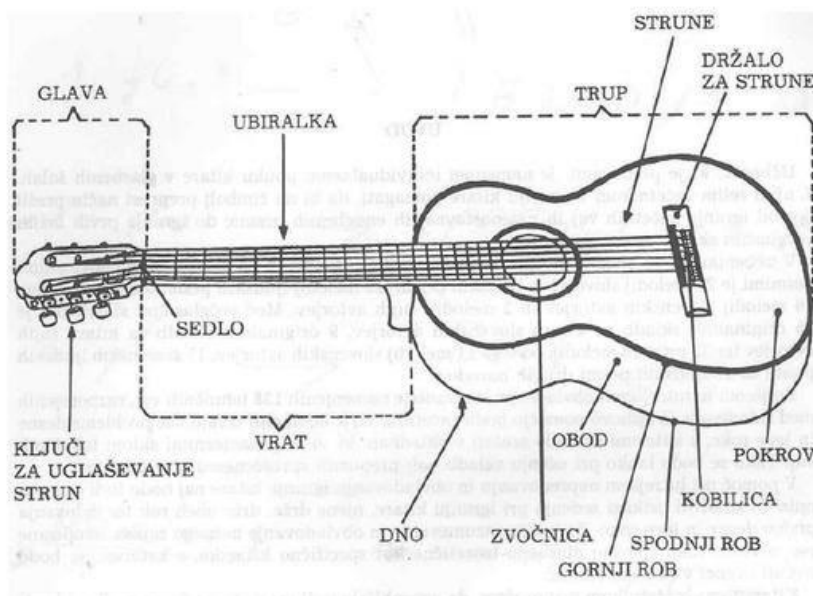
Spekter je odvisen načina ustvarjanja zvoka, pri pihalih od načina vpihavanja zraka, pri brenkalih in godalih pa od načina ubiranja strun in od položaja kjer se strune dotikamo. V splošnem na spekter vpliva zelo veliko število dejavnikov, eden najpomembnejši je kvaliteta samega glasbila.



Slika 12: Frekvenčni spekter flavte in violine

NASTANEK IN PRENOS ZVOKA PRI KITARI

Kitara je instrument, ki spada v skupino brenkal. Brenkala zvok proizvajajo preko strun. Brenkala se imenujejo zato, ker zaigramo neposredno na strune. Klavir tudi proizvaja zvok preko strun, vendar nanje igramo posredno, preko tipk, ki premikajo klavirca, ki tolčejo po strunah. Pri kitari se ton lahko, zaradi neposrednega igranja po strunah, močno spreminja in je odvisen tudi od oblikovanja nohtov pri kitaristu. Ton pri kitari se spreminja tudi glede na položaj desne roke glede na trup. V glasbi rečemo, da igramo nad zvočnico, ali bolj *sul tasto* ali pa bolj *sul ponticcelo*. Prvo pomeni, da je roka, ki ubira strune, postavljena nad odprtino v trupu, iz katere se zvok najbolj širi. Drugo pomeni, da je roka, ki ubira strune, postavljena bolj proti vratu kitare. Tako postane ton mehkejši, bolj žameten in zveni globlji. Tretje pomeni, da je roka, ki ubira strune, postavljena bolj proti kobilici kitare.



Slika 13: Zgradba in sestavni deli kitare

Zvok se da spreminjati tudi z delom leve roke. Zelo visoko razumevanje proizvodjanja zvoka na kitari lahko dosežemo že z izoliranjem strune in njenimi vibracijami. Kobilica kitare leži na resonančni plošči kitare in je del na katerega so strune pripete. Preko kobilice se zvok tudi prenaša na resonančno ploščo. Če zaigramo bližje kobilici kitare, zvok postane ostrejši, občutek imamo, da se je zvišal. Ton je odvisen tudi od kota v katerem zaigramo po strunah.

Kitaro lahko razdelimo na tri glavne dele. To so glava, vrat in trup. Glava drži strune ter uravnava njihovo višino. V glavi so še vijaki, ki preko polža pripomorejo k temu, da se strune ne razglašujejo in da jih lahko natančno uglasimo. Vrat je del, čez katerega so strune napete. Na vratu ležijo prečke, ki jih je po navadi dvajset. Te prečke so na

vratu zato, da krajšajo dolžino strune in s tem uravnavajo višino tona. Trup je del, na katerem se zvok proizvaja. Na njem leži kobilica. Trup sestavljata spodnja in zgornja resonančna plošča, ki sta povezani z rebri, ki jih je po navadi sedem.

Zvok se ustvari na struni. Vendar struna sama ne zveni prav dobro. Zato sta dva razloga. Prvi je, da zajema zelo majhno površino in zato zelo malo zatrese zrak. Drugi je, da je vsak val, ki prihaja iz katere koli strani uspešno zaustavljen ob trku z valom, ki prihaja iz nasprotne strani, ker je dolžina strune krajša od valovne dolžine, še posebno pri nižjih frekvencah.

Zvok pri kitari se začne proizvajati na struni, ki jo glasbenik zaigra. Struna se zatrese. Vibracije se prenesejo na kobilico in iz kobilice na trup. Trup prenaša tresljaje na zrak, del znotraj plošč, del zunaj plošč. Zrak zunaj plošč prenese zvok, vendar ta zvok še zmerom ni zelo glasen. Zvok se najbolj ojača znotraj resonančnih plošč. Skozi odmevnik, ki leži na zgornji resonančni plošči, gre zrak ven in zvok se preko zraka širi naprej. Ta zvok pa je že precej močan, glasen.

KLASIČNA KITARA

Strune na kitari so uglasene v kvartnem razmerju. To pomeni, da je interval med prvo in drugo struno čista kvarta. Edina izjema je interval med drugo in tretjo struno, ki je velika terca. V glasbi to pomeni interval, ki obsega dva cela tona in pol. V fiziki pa je pomembno, da vemo, da je, če ima prvi ton tri frekvenčne enote (npr. 300Hz), bo imel drugi ton štiri frekvenčne enote (400Hz). To v naravnem intervalu pomeni 4:3.

Običajna klasična kitara ima 120 polj. Ta polja lahko zaradi različne uglasitve strun večkrat ponovijo isti ton. Število tonov, ki jih lahko zaigramo na kitaro, je torej znatno manjše, kot je število polj. Kitare imajo veliko lastnosti, ki se od kitare do kitare razlikujejo. Na primer les, iz katerega se izdelujejo kitare, je že med različnimi drevesi različen. Za izdelavo kitar se navadno uporabi cedrov ali smrekov les, ki se razlikujeta po zgradbi in oddajata različno barvo zvoka. Zaradi vsega tega je primerjanje spektrov zvoka različnih kitar obširno področje raziskovanja.



Slika 14: Klasična kitara Šali

Kitare so razvrščene po odliki in ceni. Določajo jih postavitev reber, les, resonanca plošče in še nekaj drugih lastnosti. Razlike se poznajo v glasnosti kitar, lepoti tona, prenašanju udarcev, kar pomeni moč udarca, ki ga lahko kitara prenese brez škripanja, enostavnost igranja, kar pomeni, da je debelina vratu ravno pravšnja. Človeško uho je zmožno razločiti in med toni izbrati najlepšega.

Udarec po struni kitare nanjo prenese energijo. Ta energija požene valovanje, ki se na drugem krajišču odbije, obe valovanji se seštejeta in ustvarita stoječe valovanje. Če to valovanje analiziramo, lahko ugotovimo, kolikšen delež energije pripada posamezni frekvenci glede na ostale. Razporeditev energije zvoka po frekvencah določa lastnost zvoka oziroma njegovo kvaliteto.

Ta razmerja smo opazovali, ko smo primerjali različne kitare in na različne načine vzbujali nastanek zvoka ter poskušali zvok tudi besedno opisati.

UGLASITEV KLARINETA IN KITARE

Kitara je instrument, pri katerem so toni uglaseni enako zvoneče kot pri klavirju. Edina razlika je, da ko beremo notno črtovje za kitaro, na kitari vsak ton zveni eno oktavo nižje, kot če isto črtovje beremo na klavirju. Ko kitaristi rečejo, da imajo kitaro uglaseno na 440 hercev, imajo v mislih, da so vsi toni uglaseni v razmerju na ton a na 1 struni, ki je uglasen na to frekvenco. Kitaristi pa »žal« kitare pogosto uglasujejo po posluhu, zato uglasitev ni 100 % natančna. Kar pa za našo raziskovalno nalogo pomeni le zamaknjen spekter frekvenc.

Pri klarinetu je uglasitev malce bolj komplicirana in hkrati tudi veliko bolj enostavna kot pri kitari. Klarinet je poimenovan glede na njegovo uglasitev. V naši raziskovalni nalogi smo uporabljali B-klarinet. Uglasen je drugače kot kitara in flavta, Če želimo na klarinetu in kitari zaigrati isti ton, moramo note enega izmed instrumentov transponirati, kar pomeni preglasiti vse tone, da se ujemajo z uglasitvijo drugega instrumenta.

Razen tega pa se da uglasitev na klarinetu tudi frekvenčno rahlo uravnavati s spreminjanjem dolžine sodčkov, z večanjem razdalje med sodčkom in trupom.

Zanimivosti:

Uglaševanje po posluhu močno variira, če je človek bolan, saj se poslabšajo njegove sposobnosti zaznavanja.

Ljudje z absolutnim posluhom lahko razpoznavajo različne tone, intervale in lestvice brez pripomočkov. Glasbeniki se pogosto priučijo in dobijo relativni posluh, vendar za razliko od absolutnega posluha, brez pripomočkov različnih tonov ne morejo določiti, lahko pa razpoznavajo intervale in lestvice.

EKSPERIMENTALNI DEL

MERILNI SISTEM VERNIER IN PROGRAM LoggerPro

Večino meritev, ki smo jih opravili v okviru raziskovalne naloge, smo izvedli z merilnim sistemom Vernier in jih analizirali z računalniškim programom LoggerPro. Vernier je podjetje, ki proizvaja merilne naprave v izobraževalne namene. Je eno od prvih podjetij, ki je javnosti v množično uporabo predstavilo računalnike s senzorsko tehnologijo za učenje na poskusih. Leta 1984 je Vernier začel sodelovati s podjetjem Texas, da bi svoje računalnike podprl z grafičnimi kalkulatorji, nekaj let kasneje pa so razvili tudi računalniški program LoggerPro

Sistem Vernier omogoča izvajanje meritev z merilniki, ki jih preko vmesnika priključimo na računalnik. Merimo lahko različne fizikalne količine, kot so tlak, temperatura, hitrost, pospešek, električna napetost, gostota magnetnega polja, osvetljenost in še mnogo drugih. Z njimi lahko v realnem času zajemamo podatke in jih z računalnikom obdelamo.

Lab Quest vmesnik

Lab Quest vmesnik je naprava za zbiranje podatkov iz merilnikov. Preko USB kabla ga povežemo z računalnikom. Ima 6 priklpov za merilnike. Vmesnik je priključen na električno napetost. Ko nanj priključimo izbrani merilnik, ga samodejno prepozna in nam hitro omogoči izvedbo meritve.

Vmesnik deluje v operacijskem sistemu Windows in Macintosh.

Za zbiranje in obdelovanje podatkov potrebujemo program LoggerPro.



Slika 15: Vmesnik LabQuest

Program Logger Pro

Logger Pro je program, ki omogoča zbiranje in analizo podatkov, ki jih dobimo z vmesnikom LabQuest. Z njim lahko na različne načine zajemamo podatke, jih analiziramo in grafično prikazujemo odvisnost najrazličnejših fizikalnih količin. Program omogoča tudi dodajanje slik in video analize fizikalnih poskusov.

Kondenzatorski mikrofoni Vernier

Merilnik, ki smo ga uporabljali pri analizi spektra zvoka, je Vernierjev mikrofoni. Gre za tip kondenzatorskega mikrofona (Electret Microphone), ki je primeren za proučevanje raznovrstnih zvočnih pojavov. Frekvenčno območje, ki ga zaznava mikrofoni, je med 100 Hz in 15 kHz. To pomeni, da je prilagojen slušnemu območju človeškega ušesa.

Mikrofoni omogoča proučevanje zvočnih signalov, ki jih oddajajo različni izviri zvoka, uporabimo ga lahko pri merjenju hitrosti zvoka ter proučevanju uklonskih in interferenčnih pojavov. Opazujemo lahko časovno spreminjanje tlaka zvočnega valovanja, spektre glasbenih instrumentov in analiziramo človeški glas.

Program LoggerPro omogoča analizo zvoka z uporabo Fourierove transformacije (FFT), ki razkrije spekter zvoka.

Mikrofoni ni umerjen (kalibriran), kar pomeni, da so enote, ki jih prikaže na navpični osi, poljubne. Kljub temu lahko prikažemo in kvalitativno opišemo razmerja različnih frekvenc v spektru in pridobimo osnovne informacije o zvočnem spektru.

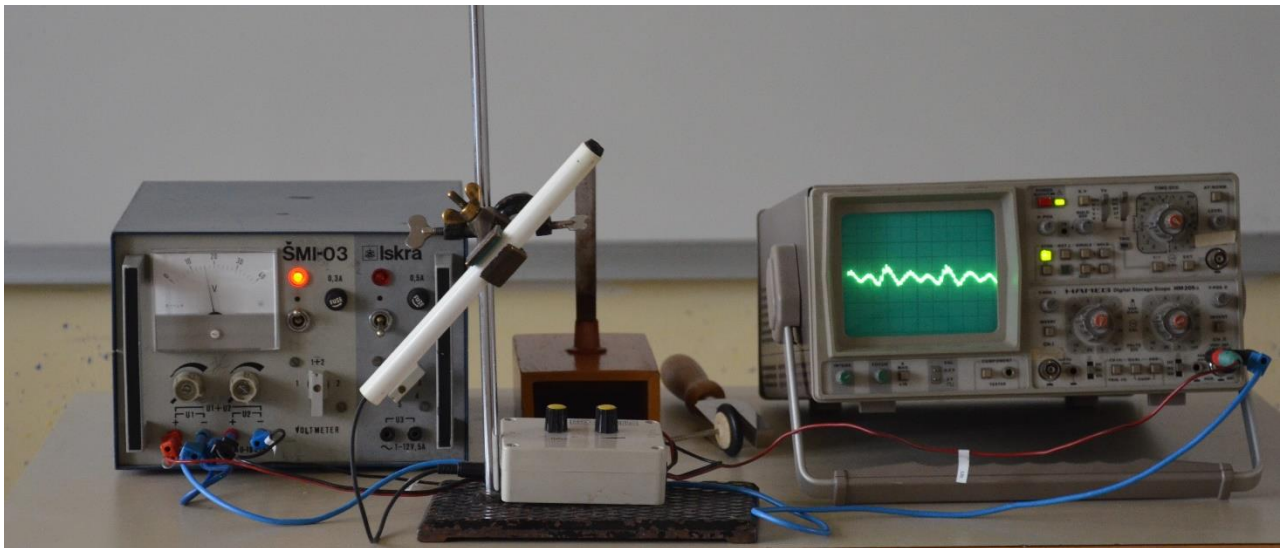


Slika 16: Kondenzatorski mikrofoni iz zbirke Vernier

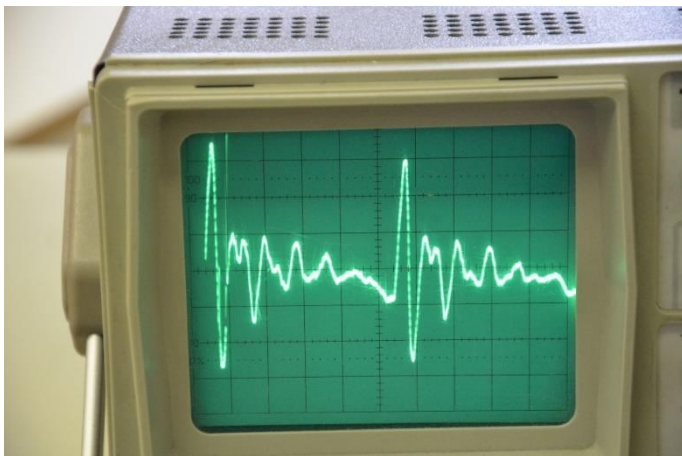
OPAZOVANJE ZVOČNIH SIGNALOV Z OSCILOSKOPOM

Opazovanje različnih zvočnih signalov z osciloskopom nam pokaže le obliko valovne fronte, ne moremo pa na tak način določiti spektra oziroma frekvenc, ki jih signal vsebuje. Na internetu lahko najdemo veliko aplikacij, ki omogočajo približno določevanje zvočnih spektrov, vendar so večinoma precej nenatančne in nezanesljive.

Pri vseh naših meritvah smo uporabili mikrofonski senzor iz zbirke Vernier in zvok analizirali s programom LoggerPro. Pri posameznih meritvah smo v odvisnosti od signala nastavili frekvenco vzorčenja in čas trajanja signala. Uvodne meritve so zbrane in prikazane na naslednjih slikah.



Slika 17:: Opazovanje zvočnih signalov z osciloskopom



Slika 18:: Opazovanje zvočnih signalov z osciloskopom

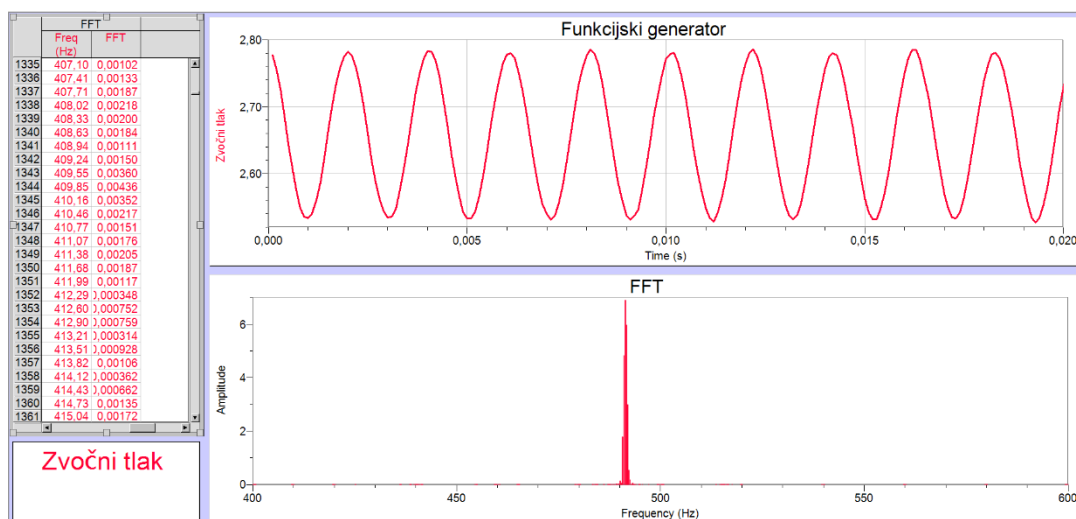
MERITVE SPEKTRA RAZLIČNIH ZVOČNIH SIGNALOV

Uvodne meritve smo opravili tako, da smo nastavili vzorčenje 10 000 vzorcev v sekundi in s časovnim intervalom zajemanja podatkov 0,03 sekunde. Hitro smo ugotovili, da so v tako kratkem časovnem intervalu meritve nenatančne, ker je število vzorcev premajhno in analiza FFT nezanesljiva. Čas smo ponastavili na 1 sekundo in s tem dosegli natančnejši vpogled v frekvenčni razpon različnih tonov na opazovanih glasbenih inštrumentih. Podaljšanje časa merjenja je omogočilo tudi bolj ponovljive rezultate. To pomeni, da smo pri obravnavi velikega števila različnih poskusov lahko potrdili, da so grafi relativno enaki.

Grafi so se medsebojno razlikovali tudi glede na razdaljo med izvirom zvoka in mikrofonom. Vpliva električnega omrežja nismo zaznali. Ko smo merili doma, zaradi pomankanja hrupa ni bilo motečih zvokov in frekvenc. Grafi so bili posledično zelo čisti. Merjenje smo opravljali na poljubno izbranih kitarah ter na vrhunskem klarinetu in povprečni flavti. Uglasitev inštrumentov ni bila popolna, vendar to meritev ne pokvari, saj višino frekvenc v FFT grafu le zamakne v levo ali desno.

SPEKTER TONA FUNKCIJSKEGA GENERATORJA

Funkcijski generator lahko ustvari zvočne signale različnih oblik in frekvenc. Najpogostejše oblike so sinusni signal, pravokotni in signal v obliki žage. Za uvodno meritev smo izbrali sinusni signal določene frekvence in ga analizirali z našim programom. Na sliki je prikazan tak signal frekvence 490 Hz. Program je izrisal obliko valovne fronte in izvedel Fourierjevo transformacijo FFT. Natančnost metode smo preverili pri različnih frekvencah in ugotovili dobro ujemanje.



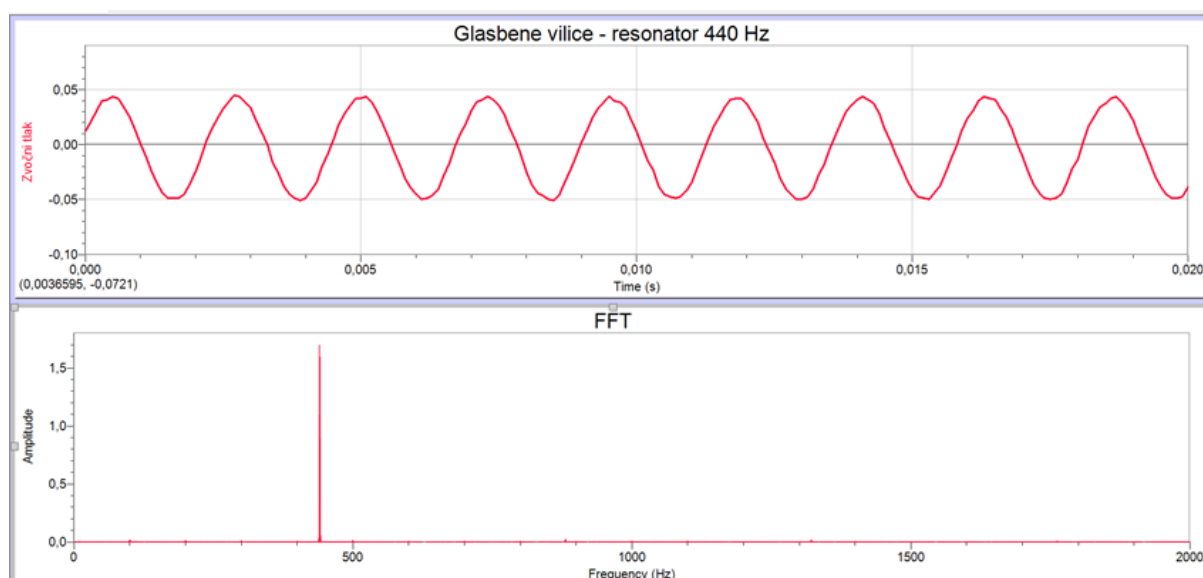
Slika 19: Analiza sinusnega signala funkcijskega generatorja

SPEKTER TONA GLASBENIH VILIC IN RESONATORJA

Glasbene vilice oddajajo zvok natanko določene frekvence. Ta je odvisna od dimenzij vilic in od snovi, iz katere so vilice narejene. Uporabljajo se za uglaševanje instrumentov. V praksi se največkrat uporabljajo glasbene vilice, ki so uglašene na frekvenco 440 Hz, ki je referenčna točka pri uglastitvi.

V spektru tona, ki ga oddajajo glasbene vilice, je torej prisotna ena sama frekvenca. Na sliki je prikazan sinusni signal in spekter glasbenih vilic, uglašeni na frekvenco 440 Hz.

Če glasbene vilice pritrdimo na votlo leseno škatlo, se zvok močno ojači. Tresljaji vilic se prenesejo na les, ki zaniha, v notranjosti resonatorja pa nastajajo zvočni stoječi valovi. Dimenzije resonatorja odločajo o tem, katere frekvence se bodo ojačile. Resonator, ki smo ga uporabili, ima dimenzije 10x5x4 cm. Analiza spektra pokaže, da ima zvočni val sinusno obliko, ki je malenkostno popačena v primerjavi s čistim sinusnim signalom glasbenih vilic.



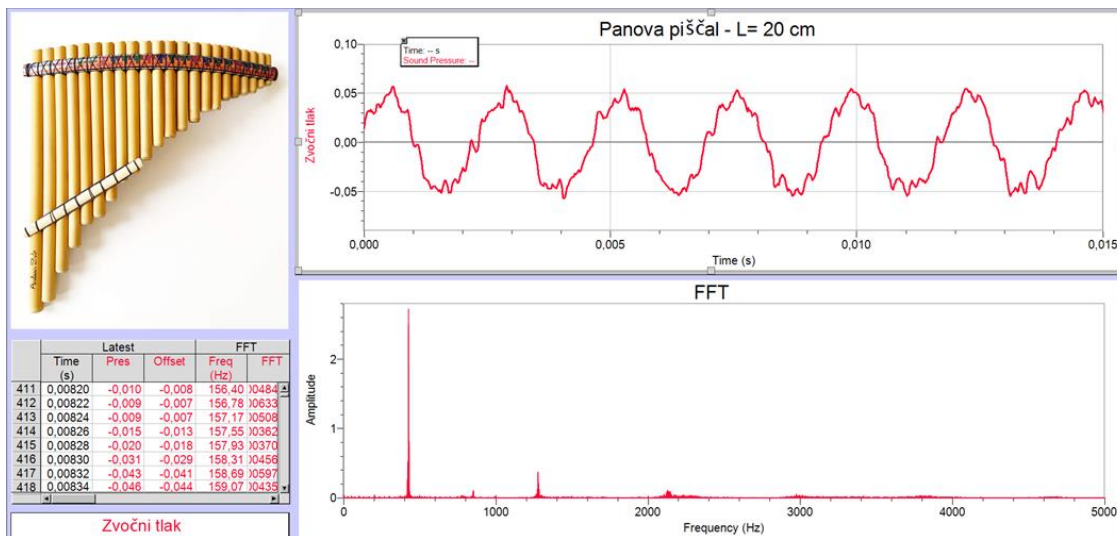
Slika 20: Spekter zvoka glasbenih vilic z resonatorjem

SPEKTER ZVENA PANOVE PIŠČALI

Panovo piščal sestavljajo povezane votle lesene cevke različnih dolžin. Posamezna cevka deluje kot polodprta piščal. Piščal oddaja zven različnih zvočnih frekvenc. Osnovna lastna frekvenca določa višino zvena, njegovo barvo pa položaji in zastopanost višje-harmonskih frekvenc.

Polodprta piščal ima ojačene višje-harmonske frekvence, ki so lihi mnogokratniki osnovne.

Analizirali smo zven piščali z dolžino 20 cm. V spektru vidimo zelo izrazito osnovno frekvenco in tudi nekoliko ojačano prvo in tretjo lastno frekvenco. Večina zvočne energije je vsebovana v osnovnem nihanju.



Slika 21: Merjenje spektra zvoka Panove piščali

Primerjava izmerjenih lastnih frekvenc z izračunanimi je prikazana v tabeli.

Lastne frekvence (meritev) FFT graf	Lastne frekvence (teorija)
421 Hz	425 Hz
1280 Hz	1275 Hz
2140 Hz	2125 Hz

Osnovno lastno smo izračunali z enačbo $v_0 = c/4L$, kjer je c hitrost zvoka in L dolžina piščali. Pri sobni temperaturi je hitrost zvoka 340 m/s. Napako odčitanih in izračunanih frekvenc smo ocenili s približno 5% natančnostjo.

ANALIZA SPEKTRA IZGOVORJENIH SAMOGLASNIKOV

Ko opazujemo zven samoglasnikov z osciloskopom, opazimo, da je ta periodičen, kar pomeni, da ga lahko razstavimo na sinusne komponente. Primerjava istega samoglasnika, ki ga izgovorijo različne osebe, pokaže, da so si v grobem signali med seboj podobni. Podrobnosti spektralne sestave si lahko ogledamo, ko s FFT transformacijo analiziramo signal. V naši nalogi smo vsi trije avtorji raziskovalne naloge opazovali spektralno sestavo samoglasnikov, posebej pa smo se posvetili analizi samoglasnika i.

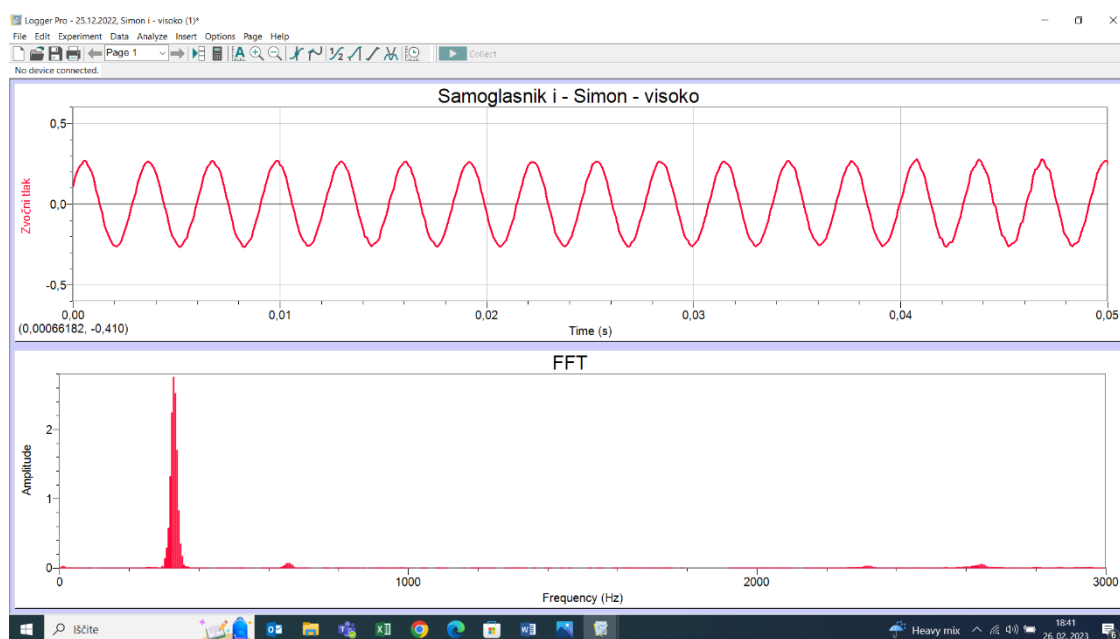
Analiza spektra samoglasnika i

Pri analiziranju samoglasnika *i* smo z mikrofonom posneli časovno odvisnost tlaka, opravili Fourierovo transformacijo in proučevali raznolikost človeških glasov. Primerjali smo razgibanost periodičnega signala ter razporeditev in energijo posameznih frekvenc v FFT grafu.

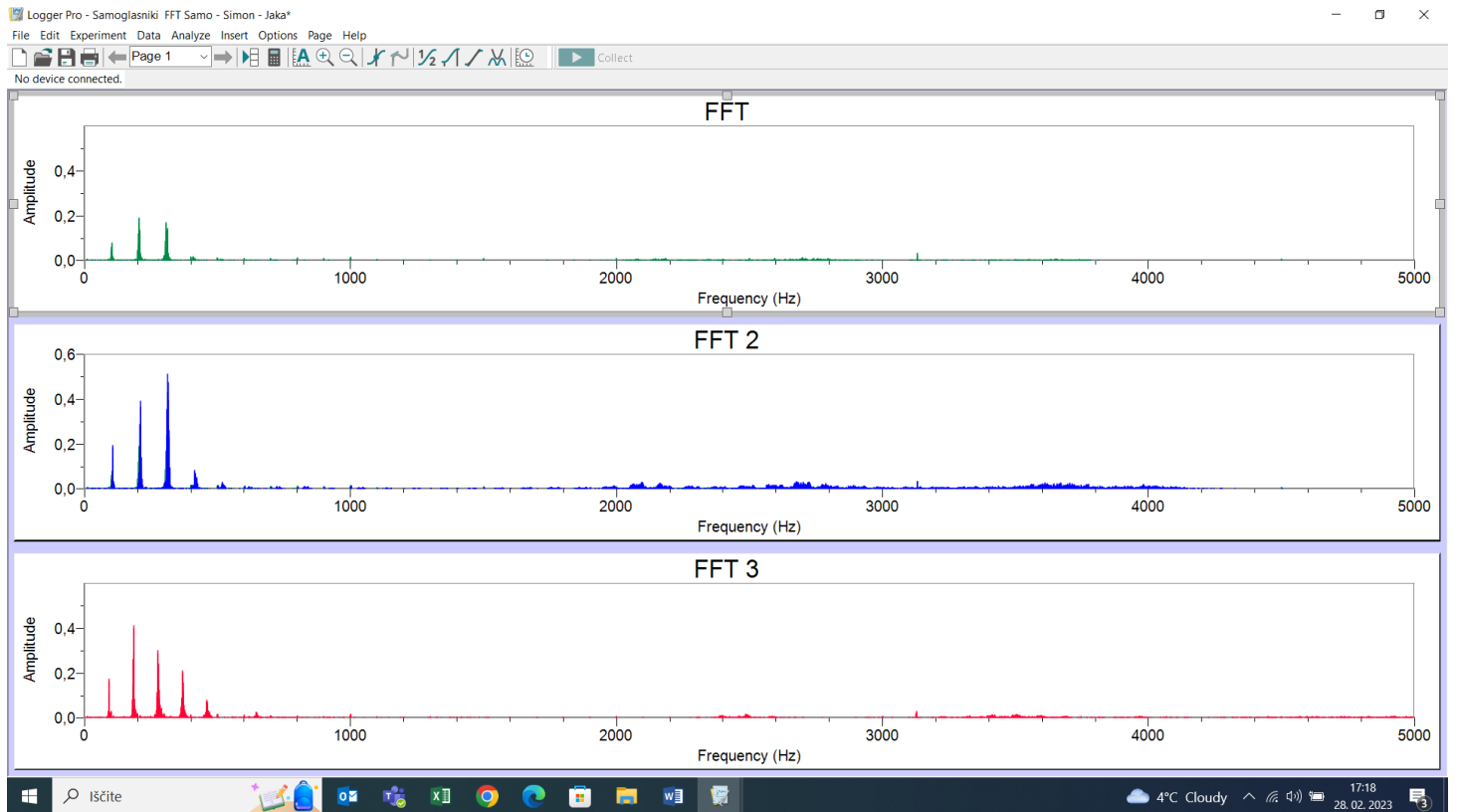
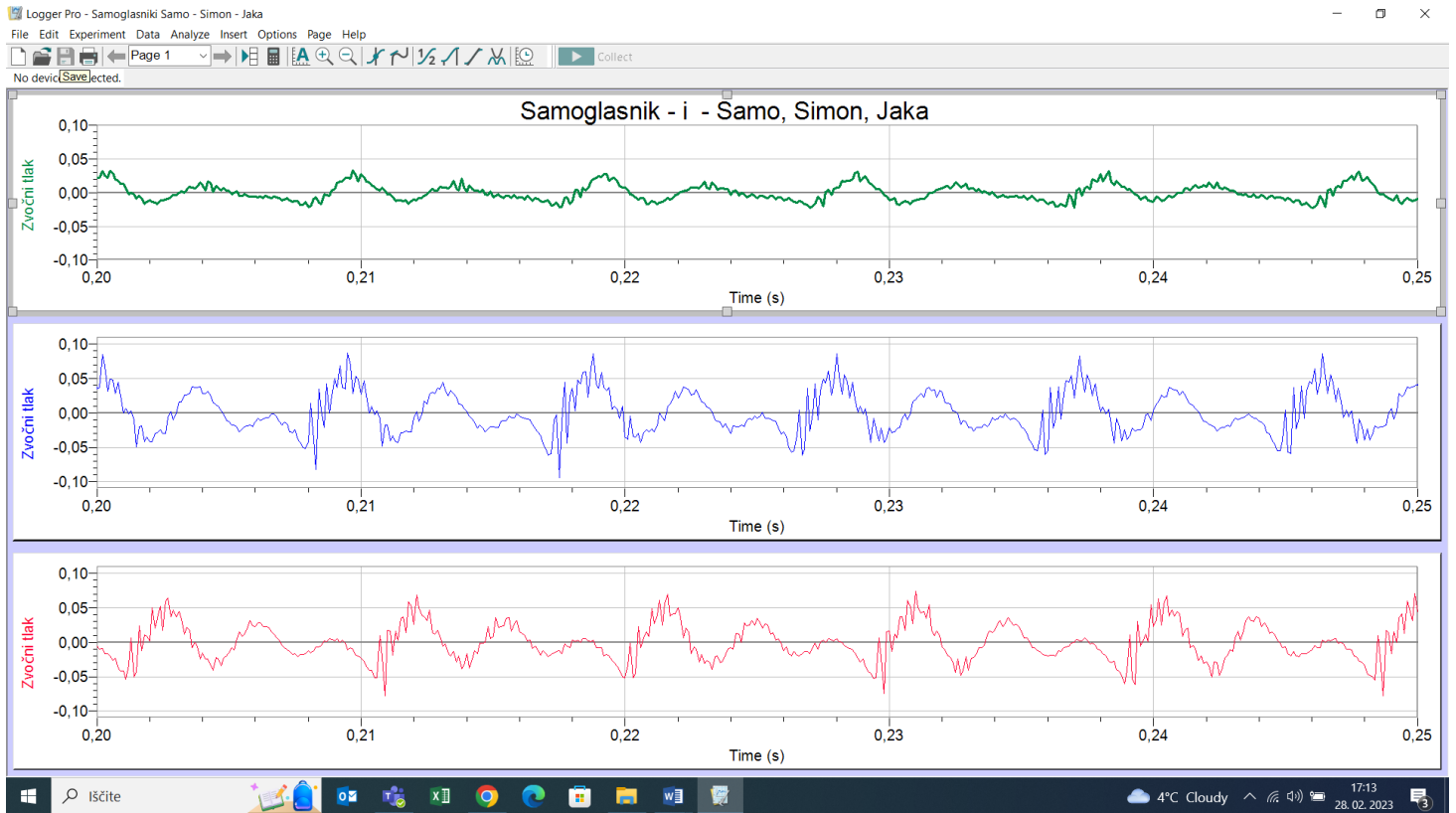
V splošnem se mnoge lastnosti med osebki iste vrste razlikujejo. V našem primeru smo si izbrali tisto, ki je povezana z zvokom in jo lahko objektivno primerjamo pri različnih osebkih. Človeške glasilke se razlikujejo po razponu in višini, vsaj tako je splošno znano. Katere razlike opazimo, smo želeli razbrati iz naših grafov. Zavedamo se, da lahko te razlike le v grobem določimo, vendar smo jih vseeno poskusili razbrati.

Za primerjavo smo uporabili tri raznolike osebke. Lastnosti glasilk so bile pri dveh primerjanih osebkih zelo podobne, imeli sta podobno višino glasu. Tretji udeleženec poskusa je imel rahlo višji glas in tudi drugačno strukturo, kar se je lepo izrazilo v grafu. Ugotovili smo, da če se ob izgovorjavi samoglasnika *i* poviša višina tona, pri katerem je črka *i* izgovorjena, se začne periodični signal bližati popolnem sinusu. Pri črki *i* izgovorjeni v tonu, ki je bližji nižjim frekvencam, se signal začne gubati in dobiva obliko podobno periodičnemu signalu črke *a*.

Ob črki *i*, izgovorjeni na višjem tonu se poleg periodičnega signala podobnega sinusu, za razliko od nizkega, ustvari manj različnih frekvenc, ki so neobičajno strnjene proti nižjemu delu frekvenčnega razpona človeškega sluha. Pri nižjih tonih so te frekvence sicer izraziteje nizke, vendar so razporejene po večjem delu frekvenčnega razpona človeškega sluha. Poleg vsega smo tako pri nizkih kot visokih tonih opazili območje med 2000 Hz in 4000 Hz, kjer se zgoščeno in z malo energije ustvari območje nedoločljivih frekvenc.



Slika 22: Simon *i*



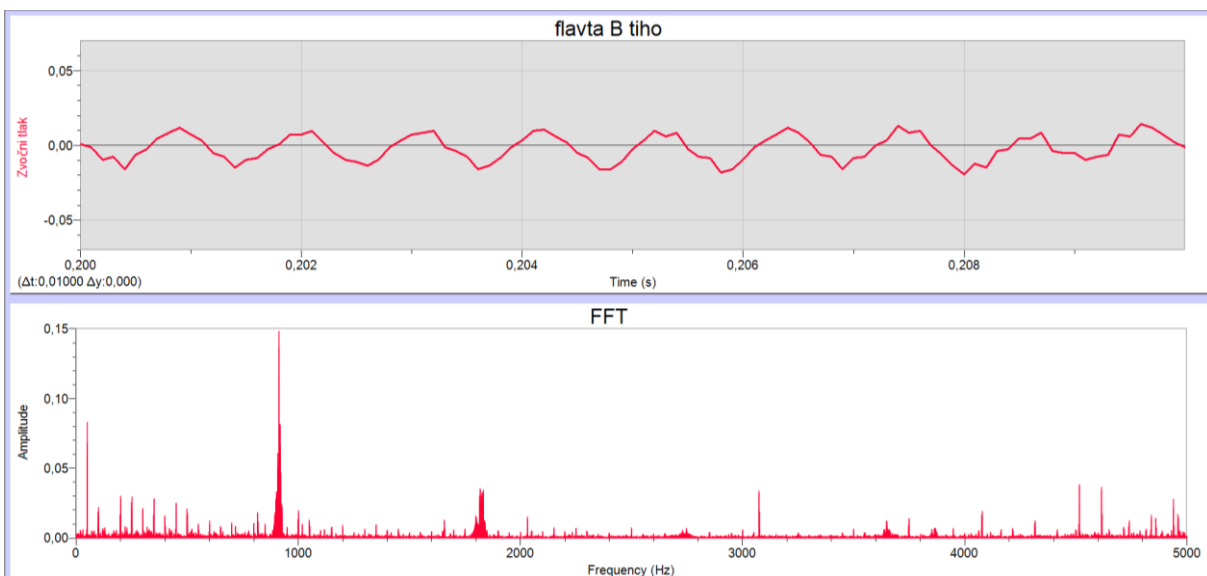
Slika 23: Spektri samoglasnika i

MERITVE SPEKTRA FLAVTE IN KLARINETA

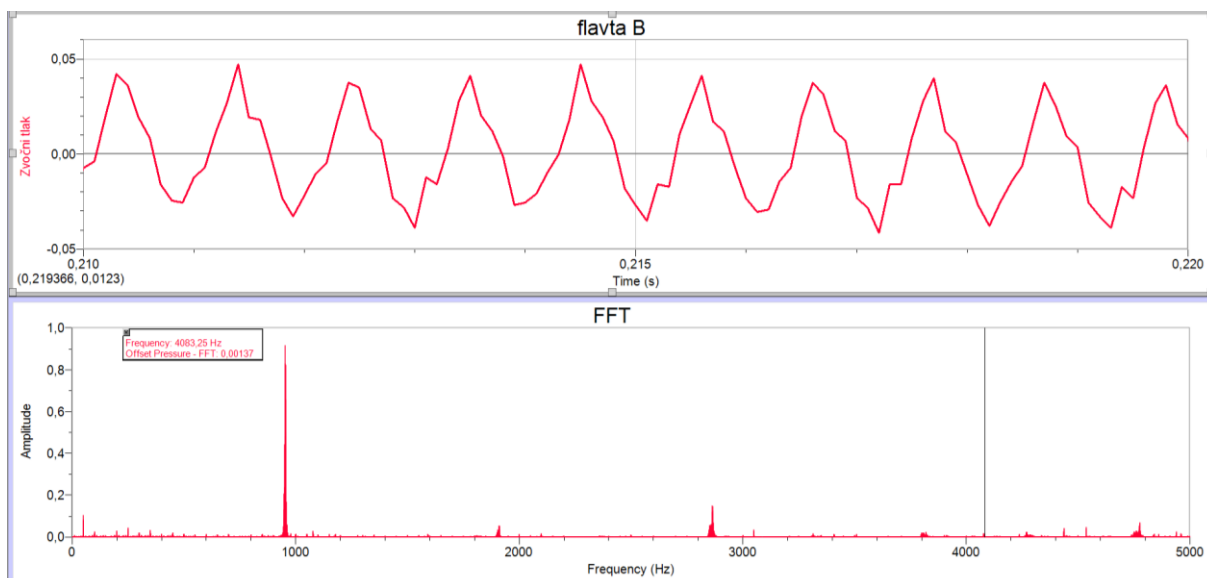
A) Flavta

Flavta je v fizikalnem smislu na obeh straneh odprta piščal. V spektru so poleg osnovne frekvence, ki je največkrat najbolj izrazita, prisotne tudi višje harmonske nihanja, katerih frekvence so celoštevilčni mnogokratniki osnovne.

Pri meritvi smo najprej primerjali razliko, če na instrumentu ton zaigramo glasno ali tiho. FFT analiza zvoka flavte pokaže, da se pri tistem tonu pojavi mnogo dodatnih frekvenc, ki bi lahko bili motilci, zaradi tišine tona. Opazili smo, da se je pri tišje zaigranem tonu več energije pojavilo tudi v višje-ležečih frekvencah. Glede na preostala glasbila, preizkušana v nalogi, ima flavta periodični signal, ki je izmed kompleksnih instrumentov še najbolj podoben sinusnemu. To se vidi tudi tako, da se osnovna frekvenca ustvari skoraj brez »družbe« drugih frekvenc.



Slika 24: Flavta B tiho



Slika 25: Flavta B

B) KLARINET

Klarinet je instrument, ki ga lahko v približku obravnavamo kot polodprto piščal. V klarinetu vzbudimo stoječe zvočno valovanje, ko vpihavamo zrak skozi posebno oblikovan ustnik, ki ima pritrjen jeziček, izdelan iz posebnega lesa. Jeziček niha ter zapira in odpira dotok zraka, pri tem nastaja zvok, značilen za ta instrument.

V spektru klarineta so poleg osnovne frekvence, v skladu s teoretičnim modelom, ojačene predvsem višje harmonske frekvence, ki so lihi mnogokratniki osnovne. Opazimo tudi šibke ojačitve sodih frekvenc, kar pomeni, da se klarinet ne podreja popolnoma modelu polodprte piščali.



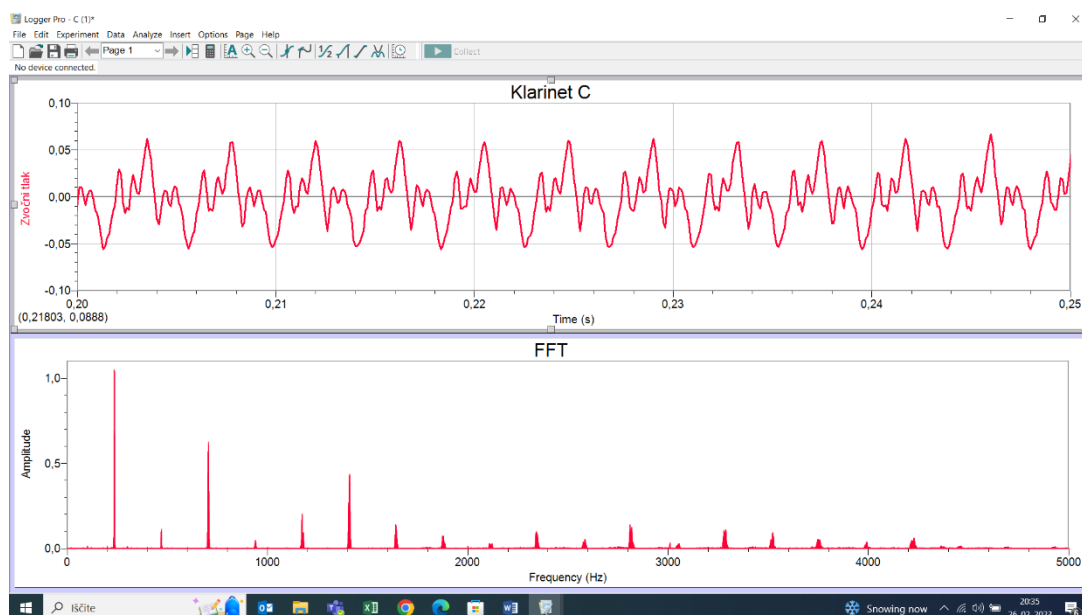
Slika 27: Klarinet



Slika 26: Ustnik klarineta

Pri analizi zvoka klarineta smo uporabili tako imenovani B–klarinet, ki ga klarinetisti največ uporabljajo. Njegova dolžina je okoli 60 cm, frekvenčni obseg pa znaša približno tri oktave.

Grafi frekvenčnih spektrov pri klarinetu so pokazali, da pri istem tonu, ki se od drugega razlikuje le po glasnosti, nastanejo razlike. V FFT grafu smo opazili, da se pri glasnem C tonu v višjih legah obrne pričakovan poudarek na določenih frekvencah, saj niso več poudarjeni samo lihi večkratniki osnovne frekvence, temveč so prisotne tudi frekvence, ki so »med« lihim večkratniki osnovne frekvence. Ton C, ki ga zaigramo tišje, tega obrata ne pozna, večina energije je v osnovni frekvenci in njenem prvem lihem večkratniku.



Slika 28: Klarinet C



Slika 29: Klarinet C tiho

Primerjava med flavto in klarinetom

Primerjavo smo izvajali na isto zvonečem tonu, ki je bil zaradi različnih uglasitev, pri flavti B in pri klarinetu C.

Pri flavti je signal skoraj sinusen in nima obsežne razporeditve frekvenc kakor klarinet. Oba instrumenta se razlikujeta v spektru, saj klarinet deluje kot polodprta, flavta pa kot odprta piščal.

Majhno število višje harmonskih frekvenc pri flavti, oziroma le ena ali dve poudarjeni frekvenci, ustvari zvok, ki ne odstopa zaznavno od sinusnega valovanja. Takšen zvok je človeškemu ušesu rahlo neprijeten in enoličen. To je nekaj, kar se pri klarinetu zgodi le v redkih primerih, pri flavti je to pogost pojav.

MERITVE SPEKTRA KLASIČNE KITARE

Zvok, ki ga oddaja klasična kitara smo opazovali pretežno na basovskih strunah. Najprej smo kvaliteto zvoka ocenjevali s poslušanjem istih tonov na različnih kitarah in ga poskušali opisati z besedami. V nadaljevanju smo subjektivno zaznavanje zvoka s spektri, ki so se izrisali v grafu FFT.

A) Primerjava istega tona na različnih kitarah

Kitare, ki smo jih uporabili so bile v različnih cenovnih razredih. To naj bi določalo kako dobra je kitara. Kljub vsemu imajo kitare lastnosti, na katerih imajo poudarek, zato je lahko cenejša kitara v neki lastnosti boljša od dražje, vendar v zaključku

primerjave dražja kitara prinese celovitejšo izvedbo. Najboljša izmed naših primerjanih kitar proizvajalca (Šali) je imela poudarjene base in manj izrazite višje tone, vsaj toliko smo lahko določili s sluhom.

Najslabša kitara (J.B. Breuer) je imela ostrejši ton, ter iz nje ni bilo mogoče izveči zares lepega tona. Ostrejši toni vsebujejo več višjaharmonskih frekvenc in manjši poudarek na osnovni. Dve izmed kitar (Hotko in Kuvač) sta si bili podobni po lastnostih in cenovnem rangu. Večjih razlik v zvoku med njima nismo zaznali. Pri kitarah smo preizkusili tudi, kako projicirajo zvok v prostor. Cena kitar se je tu v večini kar potrdila, saj je najdražja kitara najbolj zapolnila prostor in relativno glasen zvok prenesla tudi v najbolj oddaljene dele dvorane. Pri preostalih treh kitarah je bila dvorana približno enako zapolnjena z zvokom. Razlika je bila le, da je bila najcenejša kitara malce tišja.

Primerjavo smo ponovno izvajali na basovski strunah, neposredno na dveh tonih. Ton E1 smo primerjali odigranega na 4. in 5. struni, drugi ton, najnižji E smo primerjali le na eni struni, saj nižje od tega tona kitara ne zmore. Ker smo primerjavo izvajali na basovskih strunah, nas je bolj ali manj zanimala poudarjenost osnovne frekvence in usmerjenost energije v višje ali nižje frekvence, ali kje se je zbrala preostala energija.

Primerjava tona E1 na 4. struni je pokazala zanimivo podobnost med tremi izmed "slabših" kitar. Najboljša kitara je energijo enakomerno razporedila po treh najnižjih frekvencah, kar je osnovno frekvenco ločilo od ostalih treh kitar, saj je bila pri teh kitarah osnovna frekvenca v razmerju proti prvemu mnogokratniku izrazito manjša. Primerjava na 4. struni potrjuje naše slušne rezultate.



Slika 30: Primerjava Šali-Breuer

S primerjavo tona E1 na 5 struni smo lahko določili razlog za ceno najcenejše kitare. Ta je imela slabšo poudarjenost osnovne frekvence. Tri višje-cenovne kitare so bile tokrat tiste s podobnimi grafi. Glede na slušni test sicer ni bilo videti večjih razlik, kljub temu smo vseeno slišali, da je bil ton pri najcenejši kitari ostrejši kot pri preostalih treh.



Slika 31: Primerjava Šali.Breuer 5 struna

Ton E zaigran na 6. struni nas je od vseh primerjav najbolj presenetil. Ugotovili smo, da je zgoščenost frekvenc proti nekem delu frekvenčnega razpona izredno pomembna lastnost. Tokrat smo opazili podobnost grafov najcenejše in srednje drage kitare. Ena izmed srednje dragih kitar je presenetila z velikim poudarkom na eni izmed nižjih frekvenc, ni pa imela za razliko od najdražje kitare, večine energije zbrane v nižjih frekvencah. To pomeni, da se je relativno velik del energije razporedil po višjih frekvencah. Zvočno se nam je zdelo, da je presežno lepo zares zvenela najdražja kitara, medtem ko najcenejša svojih basov ni izrazila tako dobro kot kitari srednjega razreda.



Slika 32: Primerjava Šali-Breuer 6. struna

Po pregledu vseh podatkov se nam zdi, da smo dokazali, ne le s subjektivnim slušnim zaznavanjem, da se kitare zelo razlikujejo med seboj in jih lahko izdelamo na različnih nivojih. Izdelava dražje kitare zahteva zelo veliko časa, kar jim med drugim viša ceno. Ugotovili smo tudi, da boljša kot je kitara, bolj izrazito so frekvence združene v določeno polje in pogosto je osnovna frekvenca bolj poudarjena, kot pri cenejših kitarah.

B) Primerjava istega tona na različnih strunah

Poleg primerjave spektrov različnih kitar smo primerjali tudi iste tone, zaigrane na istih strunah, na istih kitarah. Pri teh tonih smo izvajali tudi variacije, kot sta vibrato in postavitev desne roke.

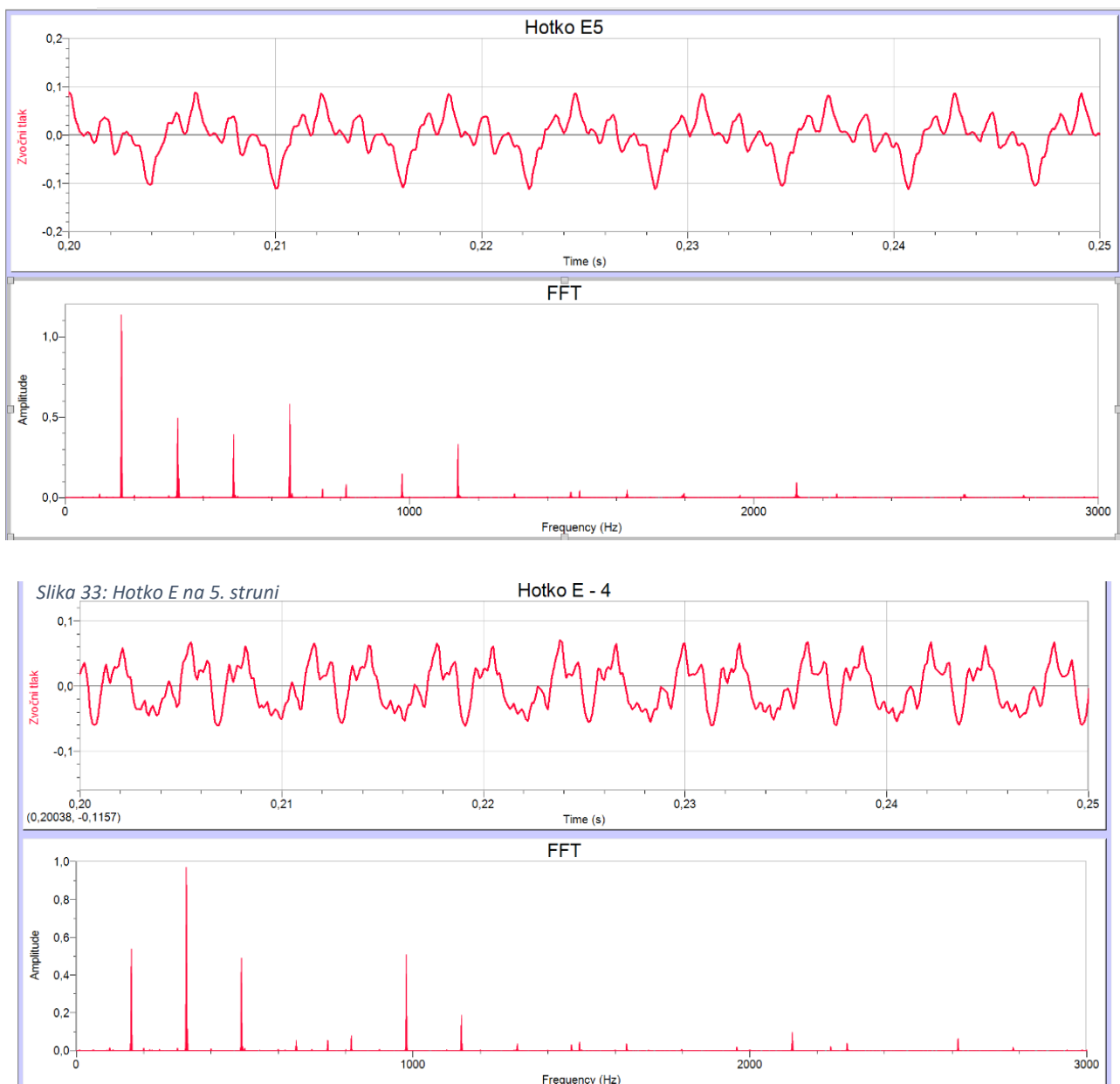
Pri kitari se debeline strun od nižjih proti višjim tanjšajo. Debelejša kot je struna, nižji so toni. Energij, ki so naložene v posamezne lastne frekvence, ne moremo določiti absolutno, ampak jih lahko primerjamo le v razmerjih. V grafu FFT so amplitude prikazane v poljubnih enotah, lahko jih le relativno primerjamo.

Primerjave smo izvajali na skrbno izbranem tonu. Ta ton je bil ton E, saj ima od vseh tonov na kitari največji obseg. Izbrali smo si drugi najnižji E, ker ga lahko odigramo

različnih strunah, medtem ko te možnosti najnižji E nima.

B1) Brez variacij

Grafe petih različnih kitar smo primerjali med seboj. Razlike v grafih FFT so bile izrazite. Ton odigran na peti struni kitare, je imel večino energije usmerjene v osnovno frekvenco, ko pa je bil odigran na četrti struni, pa je bil delež energije pri osnovni frekvenci precej manjši. Energija se je bolj razpršila v mnogokratnike osnovne frekvence. Poleg grafov FFT smo opazovali tudi časovno odvisnost zračnega tlaka. To primerjavo bi lahko opravili tudi z osciloskopom, vendar smo zaradi enostavnejše in bolj pregledne analize vse grafe prikazovali s programom LoggerPro. V omenjenih grafih je razviden periodičen signal, ki si je na obeh strunah po vzorcu podoben. Rahla razlika je le v izrazitosti različnih izboklin.



Slika 33: Hotko E na 5. struni

B2) Vibrato

Vibrato je v glasbi kot olupšava praznih tonov. Njegov učinek ušesa lahko zaznajo kot mehkejši, prijetnejši ton. Uporaba vibrata je zaznamovana s posameznimi obdobji glasbe ter odvisna tudi od posameznega kitarista. Obstajata dve različni vibrato tehniki. Ena je nihanje prsta pritisnjene na struno, od ene proti drugi struni, ki sta sosednji struni na kateri igramo, kar struno zaniha v glede na vrat navpični smeri. Če tak vibrato zaigramo v legah, ki so blizu glavi kitare, zveni podobno, kot če bi drugo obliko vibrata zaigrali v višjih legah ali bolj proti trupu kitare. Ta oblika vibrata je razvidna kot gibanje roke, medtem ko je prst pritisnjen na struni. Gibanje roke je glede na vrat vodoravno.

Vibrato je za razliko od pustega tona v frekvenčni spekter dodal poudarek na osnovno frekvenco in poudaril nižje tone. Izrazitost vibrata je narekovala poudarjenost osnovnih frekvenc. Izrazitejši, kot je bil vibrato zaigran, bolj so bile osnovne frekvence poudarjene. Prva različica vibrata je zaradi večjih frekvenčnih in drugih premikov bolj poudarila osnovno frekvenco, druga različica je bila bolj poudarjena v višjih legah. V nižjih legah je zaradi manjše oddaljenosti strun od vrata kitare druga različica vibrata manj učinkovita. V višjih legah se pojavijo dodatne frekvence, ki bi lahko bile alikvoti, mavrica tonov, ki se pojavljajo navzgor od prvega tona po različnem obsegu zaigranih tonov.



Slika 34: Šali E vibrato na 4. struni

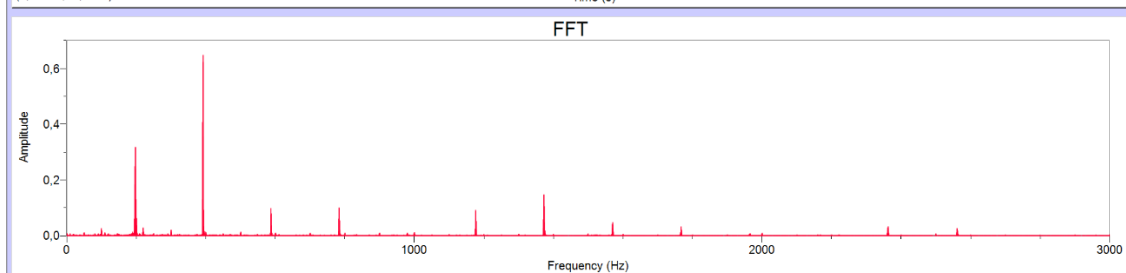
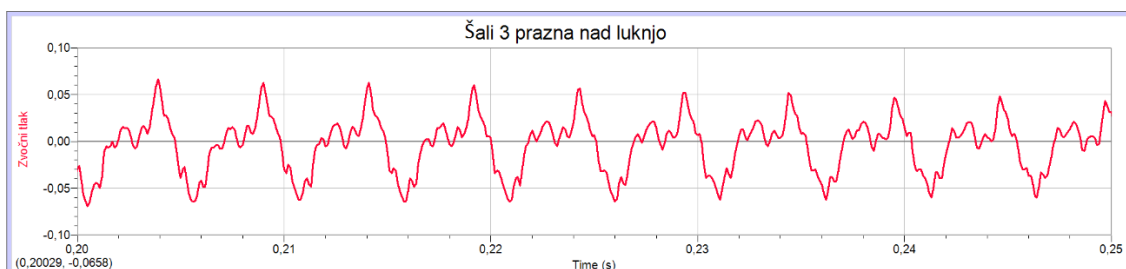
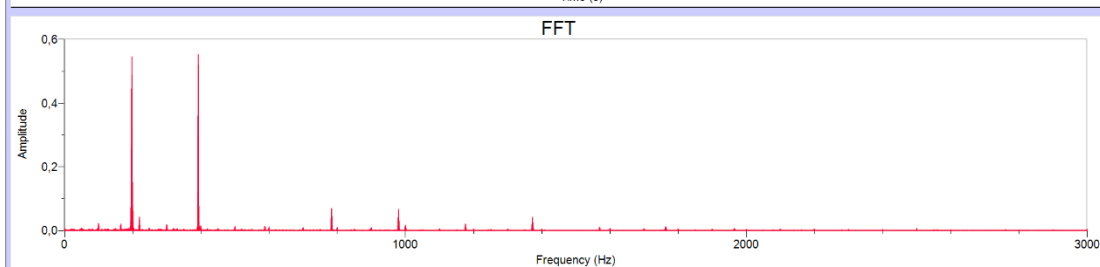
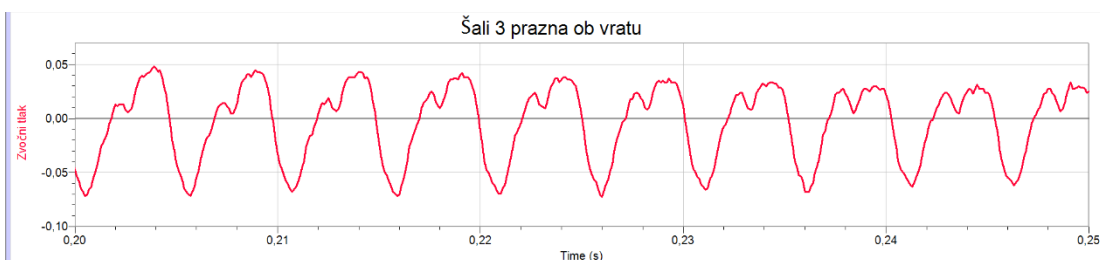
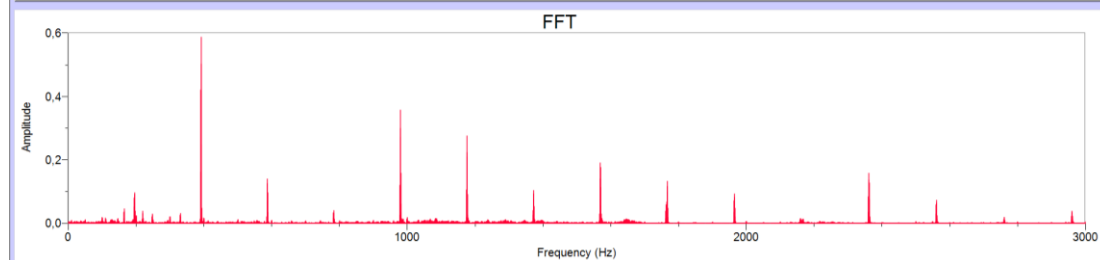
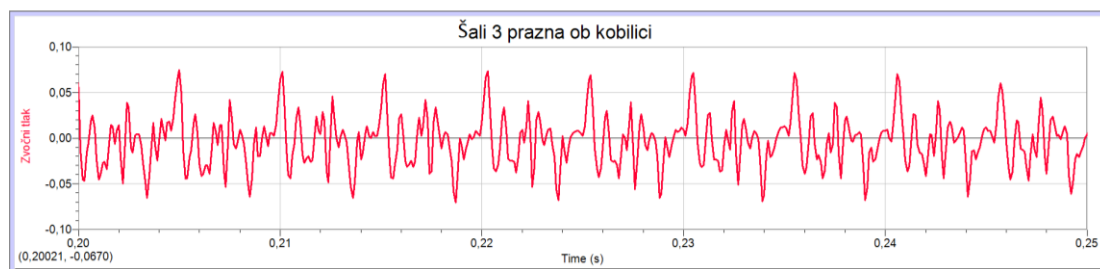


Slika 35: Šali E vibrato na 5.struni

3) Sul ponticcelo, sul tasto (bližje kobilici ali bližje vratu)

Sul ponticcelo in *sul tasto* sta italjanska izraza, ki v glasbi (pri kitari) določata postavitev desne roke glede na strune vzdolžno. *Sul ponticcelo* pomeni postavitev desne roke bližje kobilici kitare, *sul tasto* pa postavitev desne roke v bližini vratu. Splošen udarec se izvede nad odprtino (zvočnico) , *sul ponticcelo* in *sul tasto* pa se uporabljata predvsem v določenih situacijah, ker je splošen ton uporaben za večino odigranih motivov. Z variacijama se določeni motivi olepšajo ali se približajo avtorjevi zamisli.

Graf zračnega tlaka v odvisnosti od časa je prinesel še dodatno zanimivo potrditev teorije, saj je bilo ob tonu zaigranem ob kobilici valovanje zelo zgoščeno, medtem ko je bilo ob vratu in nad odprtino razširjeno in med seboj podobno. Razlike v zvoku, ki jih zazna uho, so zelo očitne.



Slika 36 : Primerjava spektrov ob postavitvah desne roke

Grafi vseh treh različic se ujemajo s tistim kar sliši človeško uho. Opazili smo, da ko je bil ton odigran bližje vratu, kjer se sliši mehkeje, je bila močno poudarjena osnovna frekvenca, saj je bilo v njej večina energije. Ob odigranem tonu nad odprtino je nastal ton, ki je nekje med obema skrajnostma. Ob tonu zaigranem ob kobilici, se je pojavilo veliko število različnih frekvenc. Osnovna frekvenca ni bila več poudarjena, veliko energije se je usmerilo tudi v višje-ležeče frekvence. Ton je oster in manj prijeten.

RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK

V času zaključevanja raziskovalne smo se imeli čast o naših rezultatih pogovoriti s profesionalnim kitaristom. Res je, da je mnogo podatkov te naloge kitaristom poznanih, nekatere, do katerih smo prišli skozi raziskovanje pa našemu sogovorniku ni bilo znano. Zanj najbolj presenetljiv podatek je bil učinkovitost vibrata. Mnogo kitaristov misli, da vibrato izvajan prepočasi ni vibrato. Ko smo ustvarjali grafe, smo se zato poigrali tudi z hitrostjo vibrata. Ugotovili smo, da počasen vibrato ne doda skoraj nič novega, hiter vibrato pa ustvari popolnoma novo obliko grafa.

Naša naloga vsebuje precej obsežno polje snovi in bi lahko bila le uvod v nadaljnja raziskovanja. Obravnavali smo precejšen del spektra zvoka, ker pa je svet relativen, je nekaj, kar se nam zdi veliko, v resnici le igla v kopici sena. V našem primeru je to področje spektrov zvoka različnih glasbenih instrumentov.

Kitaro smo izmed vsega obravnavali najbolj obširno. Pri kitari pa bi lahko sedaj začeli raziskovati spektre zvoka, ki jih na primer oddajajo različne plošče kitar. Lahko bi preizkusili, kje na kitari se frekvenčni spekter najbolj približa tistemu na klarinetu. Obstaja še mnogo variacij na kitari, ki bi jih lahko primerjali, kot je na primer uporaba capodastra. Lahko bi ugotovili, kaj se zgodi, ko na strune prisloniš skodelico. Na klarinetu in flavti nismo opravili ogromno dela, zato je tam še veliko zanimivih tem, ki bi jih lahko raziskali. Natančneje bi lahko proučevali različne variacije, ki smo jih že predstavili v tej nalogi, na primer vibrato. Lahko bi dodali še druge variacije na različnih inštrumentih. Pri pihalih je barvitost zvoka odvisna od načina vzbujanja zvoka.

Raziskovanje na tem področju je tako obsežno, da bi brez težav napisali doktorat, za raziskovalno nalogo je vsega preveč, zato smo se raje potrudili na ozkem izboru snovi.

Za nas je bil najpomembnejši predmet raziskovanja v tej nalogi kitara. Za kitaro smo se odločili, ker smo imeli na voljo največ testnih primerkov. Preko primerjave mnogih grafov smo prišli do rezultatov, izmed katerih jih nekaj nismo iskali. Najbolj nas je presenetilo, ko smo ob primerjavi različnih kitar dokazali, da cene instrumentov niso le za okras in da cenena in draga kitara vseeno ne zvenita enako. Cene sicer niso merilo, pogosto le določajo čas, ki je bil potreben za izdelavo kitare, kar posledično pomeni natančnost pri izdelavi in na koncu v krajšem času ne moreš narediti primerljivega izdelka. Z raziskovanjem smo se lotili tudi naših hipotez, ki so nas na začetku najbolj zanimale. Ugotovili smo, da smo imeli glede energije osnovne frekvence v večini prav. Smo pa raziskali, da ni pomembna le energija osnovne frekvence, ampak tudi razporeditev frekvenc in njihova skoncentriranost v določeno območje. Ena izmed naši hipotez se je nanašala tudi na flavto in klarinet. Razporeditev frekvenc po lihih večkratnikih osnovne frekvence pri klarinetu in po mnogokratnikih osnovne frekvence smo res skozi raziskovanje potrdili, vendar smo tudi ugotovili, da je bila ta hipoteza dokaj dolgočasna, tako da smo naše raziskovanje raje usmerili v primerjanje klarineta in flavte ter ene izmed variacij, ko je ton zaigran glasno ali tiho. Ugotovili smo, da že pri tako majhni variaciji prihaja do sprememb.

Naša naloga je v času izdelave naletela v na videz lahko premostljivo težavo. Preraslo je v en mesec brezdolja, ki ga je povzročila bolezen, tako da smo morali v preostanku časa trdo delati, da smo nadoknadili zamujeno. Poleg bolezni smo imeli tudi občasne težave, včasih nam je preglavice povzročal prevoz materiala, saj smo imeli na voljo le kolo. Med raziskovanjem se nam je tudi zgodilo, da nam je programska oprema odpovedala, kar je prineslo kakšen dan ali dva brez merjenja, preden smo lahko nadaljevali s popolnoma delujočo opremo.

Raziskovanje je z gotovostjo bilo nekaj najlepšega, saj smo imeli možnost premakniti meje našega znanja. Zagotovo smo najbolj uživali v merjenju in ustvarjanju grafov. Priznamo, da so nas ugotovitve včasih zabavale, včasih se nam je zdelo, da smo odkrili nekaj po popolnoma neznanega in smo kar skakali od vznemirjenja. Bilo pa nam je v največjo zabavo, ko smo razjasnili kaj smo videli. Za nas je bilo čudovito popotovanje skozi svet zvoka in mislimo da bo dovolj in bomo s tem zaključili.

VIRI IN LITERATURA

<https://www.audiobm.si/kako-slisimo-delovanje-sluha/>, 3.12.2022

<http://www.kvarkadabra.net/article.php/Kako-deluje-sluh>, 3.12.2022

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Kitara>, 3.12.2022

http://projlab.fmf.uni-lj.si/arhiv/2011_12/naloge/izdelki/ne_stojece_valovanje/teorija.html, 18.12.2022

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Valovanje>, 18.12.2022

https://si.openprof.com/wb/stoje%C4%8De_transverzalno_valovanje?ch=334, 18.12.2022

<https://eucbeniki.sio.si/nar7/1222/index1.html>, 18.12.2022

<https://www.britannica.com/science/musical-sound/Sound-production-of-musical-instruments>, 19.2.2023

French, Richard Mark (2012). *Technology of the Guitar*. Springer Science+Business Media New York

Taylor, John (1978). *Tone Production on the Classical Guitar*. London: Musical New Services Ltd.

<https://www.merriam-webster.com/dictionary/flute>, 25.2.2023

<https://en.wikipedia.org/wiki/Aerophone>, 20.2.2023

<https://guides.lib.uw.edu/c.php?g=673496&p=4756536>, 20.2.2023

<https://www.vernier.com/>, 29.12.2022

Instrumenti, ki smo jih uporabili

Kitare: Samo Šali, classic (cedra), double top (7/8); Mirko Hotko, (1980); J.B. Breuer, (1980); Melodija Mengeš; Kuvač.