

Akustičke osobine klarineta

Kir Hromatko, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Music Academy / Sveučilište u Zagrebu, Muzička akademija**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:116:052429>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Repository / Repozitorij:

[Academy of Music University of Zagreb Digital Repository - DRMA](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

MUZIČKA AKADEMIJA

VII. ODSJEK

JOSIP KIR HROMATKO

AKUSTIČKE OSOBINE KLARINETA

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2018.

AKUSTIČKE OSOBINE KLARINETA

DIPLOMSKI RAD

Mentori: izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

red. prof. art. Milko Pravdić

Student: Josip Kir Hromatko

Ak.god. 2017./2018.

ZAGREB, 2018.

DIPLOMSKI RAD ODOBRLI MENTORI

izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

red. prof. art. Milko Pravdić

Potpis

Potpis

U Zagrebu, _____

Diplomski rad obranjen _____ ocjenom _____

POVJERENSTVO:

1. izv. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić _____

2. red. prof. art. Milko Pravdić _____

3. _____

4. _____

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU

KNJIŽNICI MUZIČKE AKADEMIJE

Akustičke osobine klarineta

Sažetak

Tema ovog diplomskog rada su akustičke osobine klarineta i njegove specifičnosti kao drvenog puhačkog instrumenta približno cilindričnog oblika cijevi zatvorene na jednom kraju. Na samom početku ukratko je opisan povijesni razvoj klarineta. Zatim su objašnjeni fizikalni pojmovi poput valova i njihovog širenja te zvuka kao vrste vala. U nastavku su razmatrani nastanak i širenje zvuka prilikom sviranja drvenih puhačkih instrumenata te njihove karakteristike, a potom i akustičke osobine klarineta. U okviru ovog rada snimljeno je i nekoliko tonova na klarinetu te su njihove osobine prikazane i uspoređene s teorijskim tvrdnjama.

Ključne riječi: klarinet, akustika, zvuk, valovi

Acoustical characteristics of the clarinet

Abstract

The topic of this thesis are the acoustic properties of the clarinet and its characteristics as a woodwind instrument resembling a stopped cylindrical pipe. Firstly, a short overview of the clarinet's historical development is given. Secondly, the physics of waves and their propagation is discussed, with emphasis on sound as an example of a wave. Thirdly, the creation and propagation of sound with woodwind instruments, and especially the clarinet, are considered. Finally, the results of recording several sounds of the clarinet are presented and compared with the theoretical claims.

Keywords: clarinet, acoustics, sound, waves

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. O klarinetu	2
2.1. Povijest klarineta	2
2.2. Građa klarineta	4
3. Fizikalne pojave	6
3.1. Valovi	6
3.2. Zvuk	7
3.2.1. Svojstva zvuka	8
3.2.2. Širenje zvuka	9
4. Akustičke osobine instrumenata	12
4.1. Puhački instrumenti	13
4.2. Klarinet	15
4.2.1. Nastanak i karakteristike zvuka	15
4.2.2. Stojni valovi u klarinetu	17
4.2.3. Registri i spektar klarineta	20
5. Eksperimentalni rezultati	23
5.1. Frekvencijski opseg	24
5.2. Dinamički opseg	26
5.3. Prstomet za ozvučavanje	29
5.4. Ukršteni prstomet	30
6. Zaključak	31
Literatura	32

1. Uvod

Od njegovog nastanka klarinet je među najčešće upotrebljavanim drvenim puhačkim instrumentima. Uz solističke i komorne izvedbe, koristi se u gotovo svakom većem sastavu, od *jazz* sastava do simfonijskih orkestara. Usprkos relativno velikom broju klarinetista, nema mnogo literature o klarinetu na hrvatskom jeziku. S druge strane, strana literatura uglavnom obrađuje akustičke osobine klarineta kroz tek nekoliko odlomaka ili stranica.

Cilj ovog diplomskog rada je predstavljanje osnova akustike klarineta. Nakon kratkog pregleda razvoja instrumenta kroz povijest, objašnjeni su osnovni fizikalni pojmovi (poput zvučnih valova, refleksije i stojnih valova) koje je potrebno razumjeti prije razmatranja akustike. Zatim su opisane fizikalne pojave koje prate nastanak i širenje zvuka prilikom sviranja puhačkih instrumenata, a potom i specifičnosti klarineta. Na kraju su prikazani rezultati snimanja zvuka klarineta i njihova usporedba s teorijom.

Svaki glazbenik teži ovladavanju svojim instrumentom u što većoj mjeri, a dio toga je i upoznavanje s njegovim fizikalnim karakteristikama, mogućnostima i ograničenjima. Namjena ovog rada je da na što jednostavniji način predstavi osnovne informacije koje bi mogle koristiti svakom klarinetistu te da uz informativni karakter posluži i kao motivacija za daljnje bavljenje temom.

2. O klarinetu

Klarinet je *aerofoni* instrument, tj. instrument čiji zvuk nastaje titranjem zraka. Aerofoni instrumenti kod kojih svirač dahom uzrokuje nastanak tona zovu se *puhački instrumenti*, a dijele se na limene i drvene puhačke instrumente. Drveni puhački instrumenti mogu biti bez jezička (npr. flauta) ili s jezičkom, jednostrukim ili dvostrukim. Klarinet je drveni puhački instrument s jednostrukim jezičkom, a njegova specifičnost je približno cilindričan oblik cijevi koja je zatvorena na jednom kraju i može biti različitih dimenzija. Iako u obitelji klarineta postoje mnogi instrumenti (klarineti u Es, B i A, basetni rog, alt-klarinet, bas-klarinet itd.), u svakodnevnom govoru pod pojmom "klarinet" se obično misli na mezzosopranski klarinet u B.

2.1. Povijest klarineta

Iako nema potpuno pouzdanih izvora, smatra se da je klarinet nastao krajem 17. stoljeća (oko 1690. godine), a njegov izum se obično pripisuje Johannu Christophu Denneru iz Nuremberga. Glavna razlika između klarineta i njegova prethodnika, *chalumeau*, je u postojanju tipke koja omogućuje lako prepuhivanje tonova iz osnovnog registra za interval duodecime. Također, J. C. Denner je odvojio usnik od ostatka instrumenta te dodao još jednu tipku i zvono na kraj. Zajedno sa sinom Jacobom izrađivao je klarinete uglavnom ugođene u C ili D. Dennerov klarinet imao je dvije tipke, a njihov broj postupno je povećavan tijekom 18. stoljeća.

Početak 19. stoljeća Iwan Müller je predstavio klarinet s 13 tipki i izumio metalnu obujmicu koja pričvršćava jezičak za usnik, a otprilike u to vrijeme došlo je i do postepenog prijelaza između sviranja s jezičkom na gornjoj usnici i sviranja s jezičkom na donjoj usnici. U drugom dijelu 19. stoljeća Carl Bärmann predstavio je klarinet sa 17 tipki kao unaprjeđenje Müllerovog sustava, a nakon nekoliko promjena konačni oblik tzv. njemačkog sustava uveo je njemački klarinetist Oskar Öhler 1888. godine.



(a) Antikni klarinet



(b) Moderni klarinet

Slika 2.1: Prikaz klarineta iz različitih povijesnih razdoblja¹

Müllerov sustav tipki bio je kompliciran za izvođenje tehnički zahtjevnijih djela pa su graditelji težili njegovom pojednostavljenju. Današnji sustav tipki francuskog klarineta, koji se sastoji od 24 rupe, 17 tipki i 6 prstenova, nastao je oko 1839. godine suradnjom klarinetista Hyacinthea Eléonorea Kloséa i graditelja instrumenata Louisa-Augustea Buffeta. Buffet je bio upoznat s mehanizmom flaute Theobalda Böhma i iskoristio je neke njegove principe na klarinetu, a mehaničke poteškoće uklonjene su uvođenjem prstenova i preklapanjem tipki. Na sličnim promjenama radio je i Adolphe Sax, izumitelj bas-klarineta i saksofona, ali koristeći prstomet Iwana Müllera.

Kod modernog klarineta najviše se koriste spomenuta dva sustava: njemački (Öhler) i francuski (Böhm) sustav. Njemački sustav koristi se uglavnom u Njemačkoj i Austriji te dijelu Švicarske i Nizozemske, dok se u ostatku svijeta uglavnom koristi francuski sustav. Glavna razlika između njih je u rasporedu tipki, ali francuski i njemački klarineti razlikuju se i u zvuku zbog različitog oblika i dimenzija rezonantne cijevi. Također, za oba sustava razlikuju se prikladni usnici i jezičci. Spajanjem tih dvaju sustava krajem 19. stoljeća nastao je novi klarinetski sustav. Ernest Schmidt i Louis Kolbe osmislili su takav hibridni sustav koji kombinira njemački provrt i francuski sustav tipki, a prvi ga je primijenio Fritz Wurlitzer. Iako je slabije raširen u odnosu na svoje prethodnike, broj proizvođača (Yamaha, Schwenk und Seggelke itd.) i popularnost ovog sustava zadnjih godina rastu.

¹ 2.1a: Orchestra of the Age of Enlightenment; <https://tinyurl.com/y7rjh99b>; 12.4.2018.

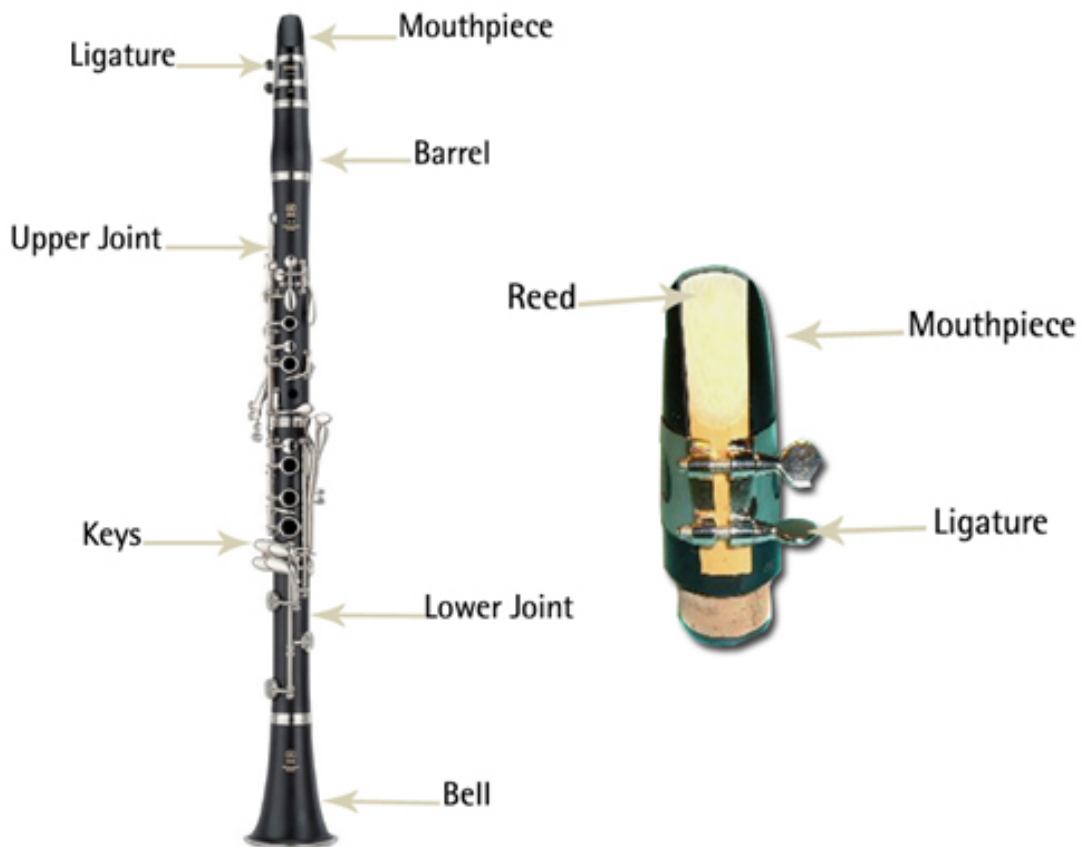
2.1b: Smith Middle School Band, Texas, SAD; <https://tinyurl.com/yb6pf3kj>; 12.4.2018.

(datum na kraju navoda je dan pristupa izvoru)

2.2. Građa klarineta

Klarinet se sastoji od nekoliko dijelova (prikazano na slici 2.2):

- usnik (eng. mouthpiece) - stvara prepoznatljiv zvuk klarineta
- jezičak (eng. reed) - potiče stupac zraka na titranje i proizvodnju zvuka
- obujmica (eng. ligature) - pričvršćuje jezičak uz usnik
- bačvica (eng. barrel) - djeluje kao rezonator
- gornji i donji dio tijela klarineta (eng. upper/lower joint) - na njima se nalaze tipke (eng. keys)
- zvono (eng. bell)



Slika 2.2: Dijelovi klarineta²

² Emily Frigatti: Clarinet infographic; <https://tinyurl.com/y6vt75ot>; 15.4.2018.

Razlike među usnicima i jezičcima znatno utječu na zvuk pojedinog instrumenta pa je poželjno da ti dijelovi klarineta ne mijenjaju svojstva ovisno o temperaturi i vlazi. Usnici se najčešće izrađuju od ebonita (tvrde, vulkanizirane gume), jezičci od trske (*Arundo donax*), a obujmice od metala ili kože.

Postoji nekoliko prednosti korištenja bačvice između usnika i tijela klarineta (za razliku od prvih klarineta). Odmicanjem bačvice od gornjeg dijela klarineta moguće je po potrebi prilagoditi intonaciju instrumenta. Također, lako je zamijenjiva u slučaju napora i pucanja materijala zbog razlika u vlazi i toplini između usnika i tijela klarineta. Međutim, glavna uloga bačvice je poboljšanje rezonantnosti instrumenta i njegovog zvuka. Bačvice od gušćeg materijala mogu znatno poboljšati zvuk klarineta, a posebnim načinom bušenja može se postići i bolje strujanje zraka kroz ostatak klarineta (a time i bolji fokus zvuka).

Na gornjem i donjem dijelu tijela klarineta nalaze se sve tipke i rupe koje služe za dobivanje različitih tonova. Kod nekih, najčešće manjih, klarineta (npr. Es-klarinet) tijelo je građeno od jednog dijela. Ukupna dužina B-klarineta je oko 66 cm, a promjer provrta uglavnom iznosi između 14.5 i 15.5 mm.

Na dnu klarineta nalazi se zvonu čija je uloga širenje zvuka najnižih tonova, dok se kod ostalih tonova zvuk većim dijelom širi kroz otvore na tijelu klarineta.

Instrument se oslanja na palcu desne ruke, za što služi poseban dio na donjem dijelu klarineta. Ostali prsti služe za pokrivanje 7 rupa i pritiskanje 17 tipki (kod standardnog B-klarineta). Velik dio mehanizma je povezan pa je potrebno pravilno postaviti klarinet prilikom slaganja.

Glavni materijal za izradu klarineta od sredine 20. stoljeća je *Dalbergia melanoxylon* (afrička ebanovina, *grenadilla*). Također, u SAD-u i Italiji se koriste metalni klarineti, a postoje i klarineti pristupačnije cijene rađeni od plastike. Zbog nedostatka afričke ebanovine od kraja 20. stoljeća izrađuju se klarineti i od drugih materijala, poput modela "Greenline" proizvođača klarineta Buffet-Crampona izrađenog od drvene piljevine i karbonskih vlakana. Takvi klarineti su otporniji na promjene temperature i vlage.

Kod većih instrumenata iz porodice klarineta zvonu i vrat su uglavnom metalni, a neki od njih, poput kontrabas-klarineta, mogu biti u cijelosti izrađeni od metala.

3. Fizikalne pojave

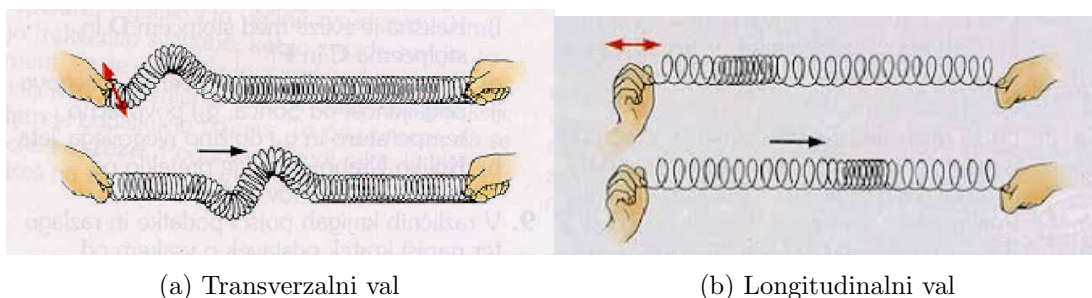
Za razumijevanje akustike instrumenata općenito, a zatim i klarineta, potrebno je upoznati se s osnovnim fizikalnim pojavama koje su vezane uz nastajanje i širenje zvuka. Bitno je razumijeti što su zapravo valovi i kakve vrste valova postoje, a zatim i kako se valovi šire kroz medij u kojem se nalaze.

3.1. Valovi

Valovi se mogu definirati kao podražaji (poremećaji) koji prenose energiju s jednog mjesta na drugo, u određenom mediju. Mogu postojati u obliku elastičnih deformacija te promjena tlaka, elektromagnetskog intenziteta, električnog potencijala ili temperature. Bitno je napomenuti da su promjene koje nastaju gibanjem vala lokalne, tj. da čestice medija ne putuju s valom. Primjeri valova su zvuk, svjetlost, valovi na vodi, "valovi" koje izvode gledatelji na stadionu itd. Iz zadnjeg primjera je lako vidljiva lokaliziranost promjena: iako se promjena (ustajanje i sjedanje ljudi) širi po stadionu, sve čestice (odnosno osobe) ostaju na svojim mjestima.

Mehanički valovi su valovi koji se šire kroz čvrsti, tekući ili plinoviti medij brzinom koja ovisi o svojstvima tog medija, odnosno njegovoj elastičnosti i inertnosti. Obično su podijeljeni u dvije skupine: transverzalni i longitudinalni.

Kod transverzalnih valova gibanje pojedinih čestica okomito je na smjer širenja vala. Primjer takvog vala je titranje napete žice (npr. kod violine ili gitare) - svaki dio žice zasebno se giba vertikalno, dok se cjelokupni val širi u horizontalnom smjeru. S druge strane, kod longitudinalnih valova čestice se gibaju u smjeru širenja vala. Sabijanje i rastezanje opruge primjer je takvog vala.



Slika 3.1: Vrste valova¹

Usporedba transverzalnog i longitudinalnog vala prikazana je na slici 3.1. Također, neki oblici valova, poput oceanskih valova i poremećaja uzrokovanih potresima, imaju svojstva i transverzalnih i longitudinalnih valova te se ne mogu jednostavno klasificirati.

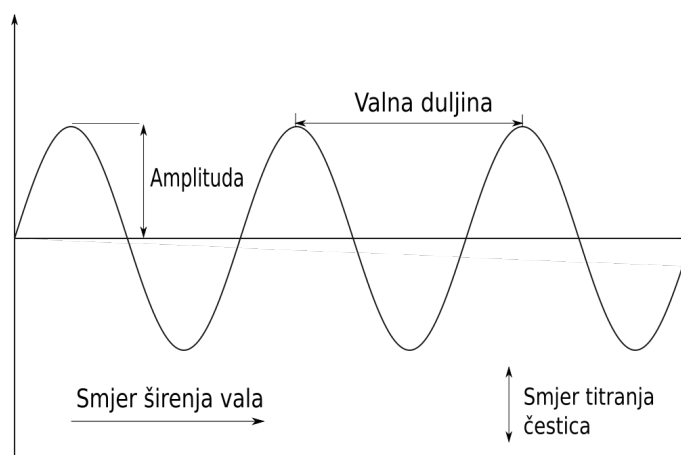
3.2. Zvuk

Zvuk je još jedan primjer longitudinalnog vala - molekule zraka titraju u smjeru širenja zvuka. Izvor (npr. membrana zvučnika) potiče čestice na titranje, a zbog "nesklada" između čestica zraka dolazi do njihovog zgušnjavanja na jednom i razrjeđenja na drugom mjestu (kao kod opruge na slici 3.1b). Nastala razlika u gustoći zraka uzrokuje promjenu razine tlaka oko razine atmosferskog tlaka. Te promjene tlaka (tzv. zvučni tlak) su ono što se percipira kao zvuk pomoću bubnjića ili mikrofona. Iznos statičkog atmosferskog tlaka obično je oko 100 000 Pa (paskala), dok njegove promjene (koje se doživljavaju kao zvuk) iznose od 0,00002 do 100 Pa. Uz promjene gustoće i tlaka, gibanje molekula zraka kod širenja zvuka prate i lokalne promjene temperature.

Radi jednostavnosti će se u nastavku razmatrati tonovi koji se u glazbi najčešće pojavljuju - harmonički tonovi, koji nastaju superpozicijom (međudjelovanjem, zbrajanjem) čistih sinusnih tonova. U prirodi su, međutim, puno češći zvukovi poput šumova i udaraca koji se sastoje od vrlo velikog broja komponenti i ne moraju imati periodička svojstva karakteristična za tonove (npr. ne može im se odrediti frekvencija).

¹ 3.1a: Osnove fizike - blog; <https://tinyurl.com/yc3jsenw>; 18.4.2018.

3.1b: Osnove fizike - blog; <https://tinyurl.com/y7w87ntp>; 18.4.2018.



Slika 3.2: Sinusni val

3.2.1. Svojstva zvuka

Za svaki harmonički, sinusni val (poput onoga na slici 3.2) karakteristična je veličina koja se zove valna duljina. Ona označava najmanju udaljenost između dvije točke vala u istoj fazi u određenom trenutku. Uglavnom se označava grčkim slovom λ i izražava u metrima, a izračunava se formulom:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

gdje c predstavlja brzinu širenja vala u mediju, a f njegovu frekvenciju. Brzina zvuka raste s porastom temperature, a u zraku pri sobnoj temperaturi od 20 °C iznosi približno 343 m/s. Kroz druge medije se zvuk širi drukčijim brzinama, npr. oko 1500 m/s u vodi te oko 6000 m/s u čeliku. Frekvencija vala govori koliko puta se čestica vala nađe u istoj fazi unutar jedne sekunde. Izražava se u hertzima (prema H. R. Hertzu), a ljudski slušni opseg pokriva frekvencije od približno 20 Hz do 20 kHz (20 000 Hz).

Iz izraza 3.1 vidljivo je da valna duljina raste s povećanjem brzine širenja zvuka i smanjuje se porastom njegove frekvencije. Ako se uzme da je brzina širenja zvuka u zraku konstantna, valna duljina zvuka će ovisiti samo o frekvenciji kojom ga izvor emitira. Raspon valnih duljina zvukova u ljudskom čujnom području je od 17 mm do 17 m. Također se može zaključiti da valna duljina ostaje ista neovisno o intenzitetu zvuka (koji pada s udaljenošću od izvora).

Osim valnom duljinom, svaki sinusni zvuk opisan je svojom amplitudom, frekvencijom i faznim pomakom. O njegovoj amplitudi ovisi intenzitet zvuka, odnosno subjektivni dojam glasnoće. O frekvenciji ovisi dojam visine tona, a kod samostalnih sinusnih tonova fazni pomak nije od velikog značaja.

Matematički opis sinusnog vala koji povezuje navedene karakteristične veličine glasi:

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (3.2)$$

gdje x označava trenutnu amplitudu vala, t vrijeme, A maksimalnu amplitudu, f frekvenciju, φ fazni pomak i T period vala. Kada bi se sinusni val "zamrznuo" u nekom trenutku, vidjelo bi se da se on zapravo sastoji od manjih dijelova određenog trajanja koji se neprestano ponavljaju. To trajanje je upravo period vala, tj. vrijeme koje je potrebno da se čestica vala ponovno nađe u istoj fazi. Period je obrnuto proporcionalan frekvenciji, tj. $T = 1/f$ (što je veća frekvencija vala, čestica brže titra i kraći je njegov period).

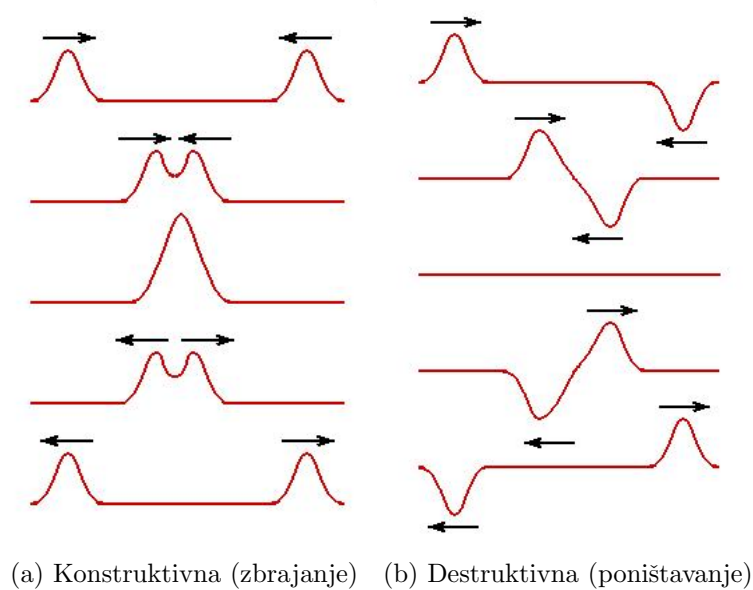
3.2.2. Širenje zvuka

Širenje zvučnog vala vrlo je složena pojava koja se obično opisuje diferencijalnim jednadžbama. Za potpuno razumijevanje zvučne "slike" u nekom prostoru potrebno je mnogo vremena i moćno računalo. Međutim, za razumijevanje principa nastajanja zvuka kod klarineta dovoljno je opisati nekoliko osnovnih pojava kod širenja zvučnog vala.

Valna jednadžba obično ima oblik poput jednadžbe 3.3, uključuje parcijalne derivacije i relativno je složena za riješiti. Međutim, za razumijevanje teksta u nastavku dovoljno je zapamtiti da amplituda vala ovisi o mjestu na kojem ju mjerimo i trenutku mjerenja. To govore izrazi $\frac{\partial p}{\partial t}$ i $\frac{\partial p}{\partial x}$, tj. derivacije zvučnog tlaka po vremenu t i prostoru x .

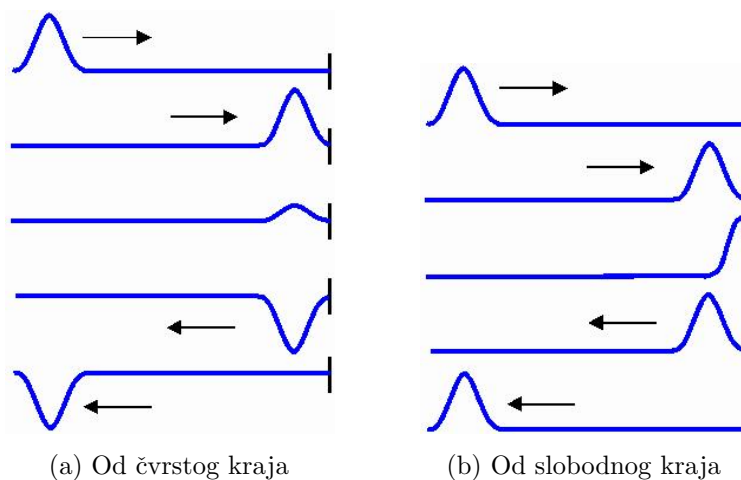
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

Za razmatranje akustike klarineta, potrebno je opisati zbrajanje i refleksiju valova kao uvjet za nastajanje stojnih valova, tj. proizvodnju zvuka kod puhačkih instrumenata. Ako se dva zvučna vala šire u mediju koji je linearan (tj. ne proizvodi nove frekvencijske komponente zvuka prilikom njegova širenja), valovi će se širiti neovisno jedan o drugome. Međutim, ako se valovi šire u istom smjeru, moguće je da dođe do njihovog zbrajanja i poništavanja. To se može lako zamisliti pomoću transverzalnih valova na žici (prikazano na slici 3.3).



Slika 3.3: Interferencija valova²

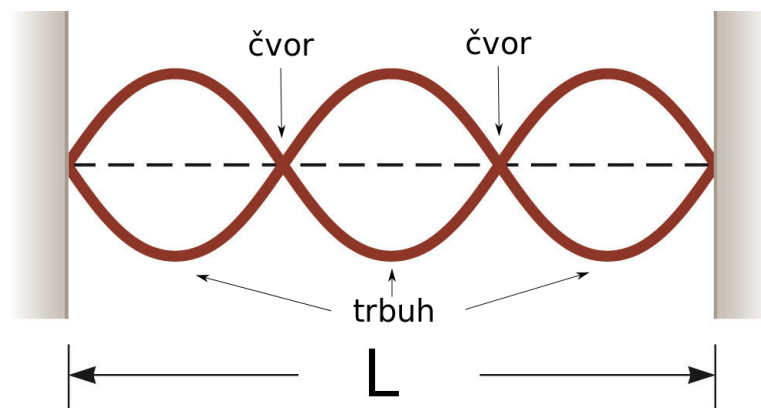
Kada val naiđe na tvrdnu površinu okomitu na smjer njegovog širenja, jedan njegov dio reflektirat će se natrag (poput morskih valova koji udaraju u obalu). Količina reflektirane energije ovisi o svojstvima prepreke od koje se val odbija. Ako je kraj medija kojim se val širi fiksiran (npr. uže pričvršćeno za zid), reflektirani val imat će suprotnu fazu u odnosu na upadni val. S druge strane, ako je kraj medija slobodan (npr. žica pričvršćena pomoću prstena za stup kojim se može gibati) dio upadnog vala koji se reflektira imat će istu fazu. Oba slučaja prikazana su na slici 3.4.



Slika 3.4: Refleksija transverzalnog vala²

² The University of Tennessee, Tennessee, SAD; <https://tinyurl.com/y7z768ab>; 18.4.2018.

Ako se u nekom mediju valna energija dovodi stalno (npr. puhanjem u cijev), zbog refleksije i interferencije reflektiranog i upadnog vala može doći do nastajanja tzv. *stojnih valova*. Primjer nastajanja stojnog vala kod transverzalnih valova je titranje žice učvršćene na oba kraja (prikazano na slici 3.5). Određeni dijelovi medija kod pojave stojnog vala miruju te se nazivaju *čvorovi*. Drugi dijelovi medija osciliraju maksimalnom amplitudom i nazivaju se *trbusi*. Stojni val može nastati i prilikom širenja longitudinalnog vala te je vrlo bitna pojava kod sviranja puhačkih instrumenata.



Slika 3.5: Stojni val³

³ Chegg Study; <https://tinyurl.com/y9fgfkl3>; 18.4.2018.

4. Akustičke osobine instrumenata

U ovom poglavlju bit će objašnjen proces nastajanja zvuka kod puhačkih instrumenata i njihove karakteristike, a zatim i detaljnije predstavljene akustičke osobine klarineta.



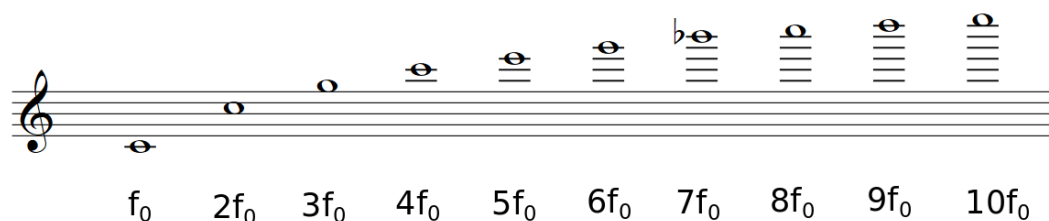
Slika 4.1: Drveni puhački instrumenti: fagot, klarinet, saksofon, engleski rog, oboa, flauta [7]

4.1. Puhački instrumenti

Kod puhačkih instrumenata je stalan dotok energije osiguran strujom zraka koju svirač proizvodi. Protokom zraka upravlja se pomoću jezičaka (kod npr. klarineta, saksofona, oboe...) ili zračnim mlazom (kod flaute i limenih puhačkih instrumenata). Ako uska struja zraka nailazi na prepreku oštrog ruba odgovarajućom brzinom i smjerom, protok će biti isprekidan i ritmičan. Time će nastati zvuk koji se dalje širi instrumentom, kontinuirano reflektira od njegovog kraja i vraća natrag.

Tijelo instrumenta služi kao rezonirajuća cijev, a frekvencija proizvedenog tona ovisi o duljini dijela instrumenta u kojem zvuk oscilira (tj. njegovoj efektivnoj duljini). Stoga, veći instrumenti u pravilu proizvode tonove nižih frekvencija, a manji viših. Nije bitno je li cijev ravna (kao kod klarineta) ili zakrivljena (kod npr. roga). Može biti cilindrična (jednakog presjeka na svim dijelovima) i konična (šireg presjeka prema donjem kraju instrumenta), a oblik cijevi određuje koje alikvote ton instrumenta sadrži.

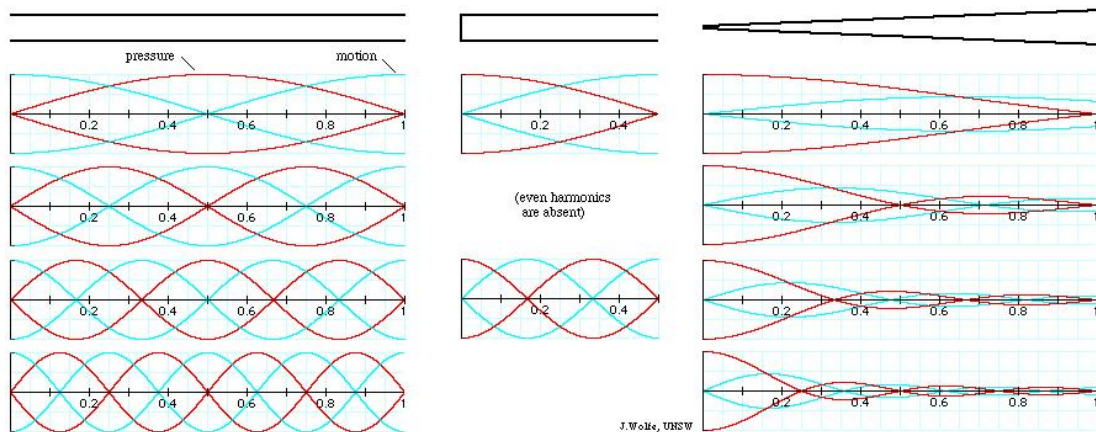
Na visinu tona može se utjecati mijenjanjem efektivne duljine instrumenta, tj. otvaranjem i zatvaranjem otvora. Najniži ton proizvodi se pokrivanjem svih otvora, a njihovim sukcesivnim otvaranjem počevši od najnižeg otvora moguće je proizvesti više tonove. Uz to, prepuhivanjem je moguće proizvesti više tonova s istim prstometom. Prepuhivanje može uključivati promjenu tlaka zraka, smjera kojim zrak dolazi ili rezonantnosti vokalnog trakta svirača. Ton dobiven prepuhivanjem zove se *harmonik* ili *aliquot*, a niz takvih tonova, počevši od osnovnog tona, naziva se *harmonički/aliquotni niz*. Na slici 4.2 prikazan je harmonički niz tona c^1 . Frekvencije viših tonova su višekratnici frekvencije najnižeg, osnovnog tona.



Slika 4.2: Harmonički niz tona c^1

Ako je cilindrična cijev otvorena na oba kraja (npr. kod flaute), valna duljina osnovnog tona bit će jednaka dvostrukoj efektivnoj duljini instrumenta. Međutim, kod poluotvorene cijevi (kao kod klarineta) valna duljina bit će jednaka četverostrukoj efektivnoj duljini. Iz tog razloga klarinet zvuči gotovo oktavu dublje od flaute iako su približno jednake duljine. Također, kod poluotvorene cijevi teoretski je moguće proizvesti samo neparne harmonike osnovnog tona (detaljnije objašnjeno u poglavlju 4.2.2).

Na slici 4.3 crvenom bojom označena je razina zvučnog tlaka, a plavom bojom oscilacija čestica zraka. Zvučni tlak minimalan je na otvorenim krajevima (tj. jednak je atmosferskom tlaku), a oscilacija čestica je maksimalna (i obrnuto). Lijevi i srednji graf prikazuju prva četiri harmonika kod otvorene i poluotvorene cijevi. Desni graf prikazuje harmonike kod instrumenata koničnog oblika (npr. oboe ili fagota). Kod takvih instrumenata se raspored čvorova i trbuha stojnog vala razlikuje u odnosu na slučaj poluotvorene cijevi pa je s takvim glazbalima načelno moguće proizvesti i parne i neparne harmonike, kao i kod otvorene cijevi.



Slika 4.3: Stojni valovi u cijevi [7]

Neovisno o obliku cijevi, svaki instrument ima svoj prepoznatljiv zvuk koji ovisi o frekvencijskom sastavu proizvedenih tonova, odnosno broju i razini alikvota.

4.2. Klarinet

Kod instrumenata poput flaute zvuk se proizvodi dovođenjem struje zraka na oštru prepreku. Međutim, kod drvenih instrumenata s jednostrukim jezičkom, poput klarineta, zvuk nastaje na malo drugačiji način.



Slika 4.4: Obitelj klarineta: klarineti u Es i B, basetni rog, bas-klarinet, kontrabas-klarinet¹

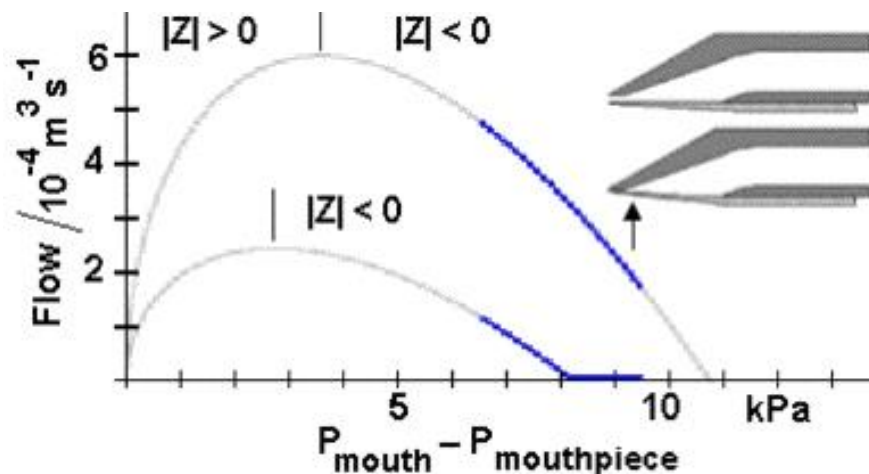
4.2.1. Nastanak i karakteristike zvuka

Svirač dovodi zrak pod tlakom nešto većim (oko 3%, prema izvoru [6]) od atmosferskog. Ovakav stalni dotok energije može se usporediti s npr. istosmjernom strujom ili protokom rijeke te sam po sebi neće proizvesti oscilacije, odnosno zvuk. Za nastanak oscilacija služi jezičak, koji je fleksibilan i može se savijati. Vibracija jezička upravlja protokom zraka prema ostatku instrumenta, a osim o držanju i pritisku ovisi i o rezonanciji u klarinetu. Jezičak stoga ima ulogu poput pretvarača istosmjerne stuje u izmjeničnu.

¹ www.die-klarinetten.de; <https://tinyurl.com/yc5vejtl>, 28.4.2018.

Ako se razlika između tlaka zraka u ustima svirača i usniku povećava, više zraka će prolaziti kroz otvor između vrha jezička i usnika. Međutim, s porastom tlaka doći će i do savijanja jezička te zatvaranja otvora kroz koji zrak prolazi. Stoga, ovisnost protoka zraka o razlici tlaka izgledat će kao na slici 4.5. Na horizontalnoj osi nalazi se razlika u pritisku u ustima i u usniku (odnosno "stisak"), a na vertikalnoj osi volumni protok zraka. Z označava akustičku impedanciju (odnosno otpor) koja se definira kao omjer akustičkog tlaka i akustičkog volumnog protoka. Specifična je za svaki instrument i ovisi o frekvenciji. Više o akustičkoj impedanciji se može pročitati u izvoru [5].

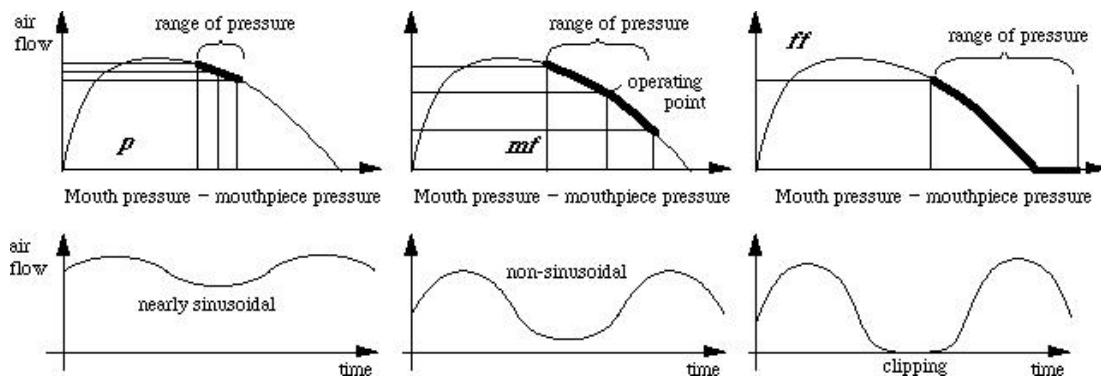
Na prikazanoj slici $|Z|$ označava iznos trenutne akustičke impedancije, a taj iznos odgovara nagibu krivulje. U lijevom dijelu grafa (gdje krivulja raste, odnosno $|Z| > 0$) otpor je prevelik, tj. "stisak" preslab, da bi se proizveo zvuk i čut će se samo šuštanje zbog prolaska zraka kroz instrument. Zvuk nastaje u dijelu grafa s negativnim nagibom ($|Z| < 0$) te se može vidjeti da postoje minimalna i maksimalna vrijednost tlaka s kojom je moguće proizvesti ton. Minimalna je označena vertikalnom crtom, a maksimalna odgovara mjestu na kojem krivulja sječe horizontalnu os. Na tom mjestu pritisak je prevelik da bi jezičak vibrirao i neće nastati ton. Gornji graf odgovara nešto tvrđem jezičku (ili većem otvoru usnika) u odnosu na donji - iznos maksimalnog pritiska je veći i u dijelu označenom plavom bojom neće doći do zagušenja.



Slika 4.5: Ovisnost protoka zraka o razlici tlakova u ustima i usniku [6]

Boja zvuka klarineta dijelom ovisi o dinamici kojom se svira. Kod tihog sviranja promjene u protoku zraka i tlaku su male, pravilne i simetrične pa je odnos protoka i tlaka gotovo linearan (označeno na lijevom grafu slike 4.6). To rezultira zvukom čiji je osnovni harmonik izražen, a viši harmonici vrlo slabi. Valni oblik takvog zvuka sličan je čistom sinusu, a zbog manjka viših harmonika moguće je postići vrlo tihe dinamike sviranja na klarinetu, što skladatelji često koriste.

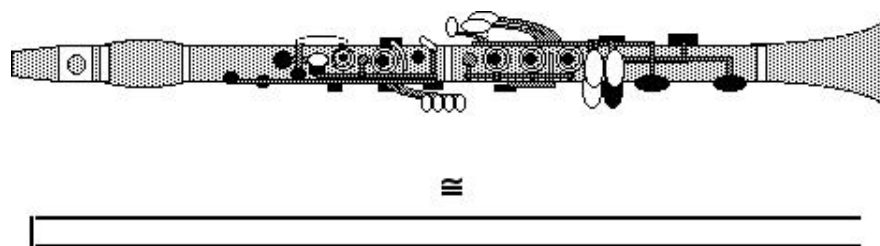
S porastom glasnoće povećava se pritisak, kao i opseg njegove promjene (srednji graf na slici). Područje promjena više nije pravac, tj. odnos protoka i tlaka više nije linearan pa su promjene nepravilnije i asimetrične, različitih brzina u različitim dijelovima titranja. Tada do izražaja dolaze i viši harmonici, a valni oblik sve manje slični sinusu. U ekstremnom slučaju, moguće je potpuno zatvoriti protok zraka u jednom dijelu ciklusa zbog niskog tlaka u usniku (desni graf na slici 4.6). U tom slučaju doći će do "rezanja" valnog oblika (eng. clipping) i pojave još više harmonika. Kod većih promjena tlaka i protoka ton sadrži više harmonika i zvuk je percipiran kao glasniji jer je ljudski sluh najosjetljiviji za frekvencije viših harmonika (otprilike između 1 i 4 kHz).



Slika 4.6: Valni oblici zvukova različitih dinamika [6]

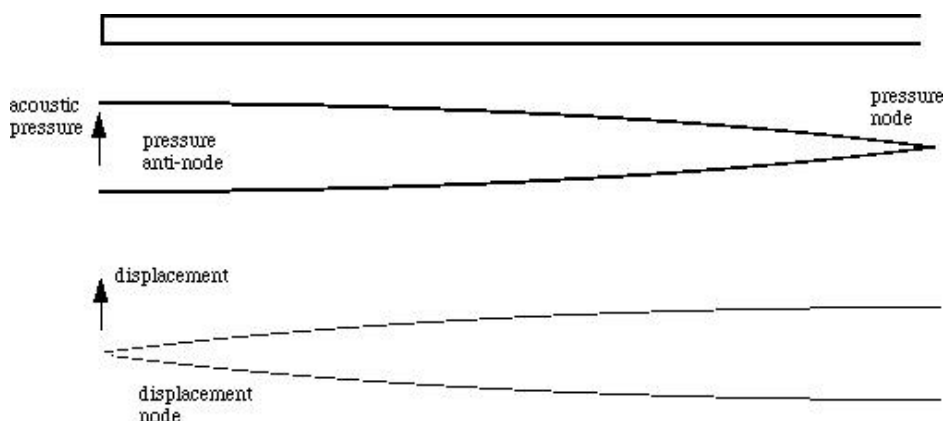
4.2.2. Stojni valovi u klarinetu

Klarinet se može aproksimirati kao cilindrična cijev zatvorena na jednom i otvorena na drugom kraju. Iako to nije posve točno, otvor između usnika je vrlo malen u usporedbi s provrtom instrumenta, kao i neravnine u samom provrtu. Također, zvono nema velik utjecaj na zvuk većine tonova. Glavne fizikalne pojave su očuvane, pa se takva aproksimacija smatra prihvatljivom.



Slika 4.7: Aproximacija klarineta poluotvorenom cilindričnom cijevi [6]

Oscilacije zraka u klarinetu koje proizvode zvuk uzrokovane su nastajanjem stojnih valova. Na otvorenom kraju (dnu) klarineta tlak je otprilike jednak atmosferskom pa je zvučni tlak (razlika trenutnog i atmosferskog tlaka) približno jednak nuli. S druge strane, u usniku je zvučni tlak maksimalan. Pomak čestica je veći gdje je tlak manji, i obrnuto (prikazano na slici 4.8).

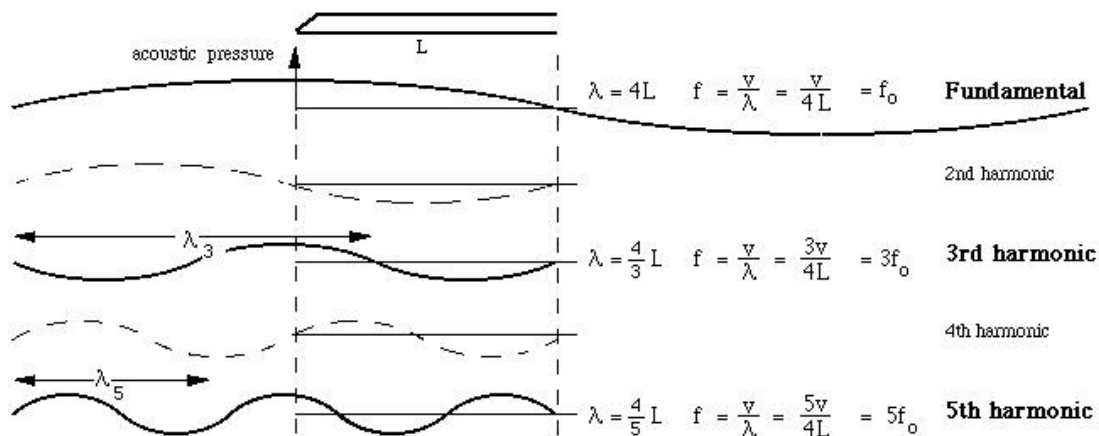


Slika 4.8: Zvučni tlak i pomak čestica kod osnovnog tona na klarinetu [6]

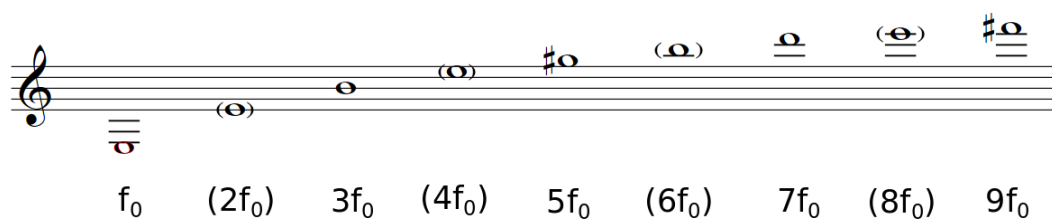
Udaljenost između nule i maksimuma u sinusnom valu jednaka je četvrtini valne duljine, pa je valna duljina najnižeg tona koji može nastati jednaka četverostrukoj duljini instrumenta. Frekvencija tona jednaka je brzini vala podijeljenoj s valnom duljinom. Najniži ton na klarinetu je *e* (pisano²), čija je frekvencija oko 146 Hz. Četvrtina valne duljine tona te frekvencije iznosi otprilike 60 cm, što odgovara klarinetu.

Više harmonike tonova u osnovnom registru moguće je dobiti prepuhivanjem, ali samo neparni harmonici zadovoljavaju uvjete minimuma zvučnog tlaka na dnu instrumenta i maksimuma na mjestu usnika (slika 4.9). Iz tog razloga harmonički niz na klarinetu razlikuje se od onoga kod npr. flaute (slika 4.2), a prikazan je na slici 4.10.

² Imena tonova u ovom radu izražena su prema zapisu u notama za klarinet, a tonovi zapravo zvuče za veliku sekundu niže



Slika 4.9: Stojni valovi harmonika osnovnog tona na klarinetu [6]



Slika 4.10: Harmonički niz najnižeg tona na klarinetu

Iako proizvedeni ton određuju rezonantne frekvencije instrumenta, jezičak ima vlastitu rezonantnu frekvenciju – takav ton uglavnom je nepoželjan i poznat je kao "kiks". U sviranju se mogućnost "kiksanja" smanjuje držanjem donje usnice na jezičku, što znatno prigušuje njegovu rezonanciju i omogućuje titranje samo na rezonantnoj frekvenciji instrumenta.

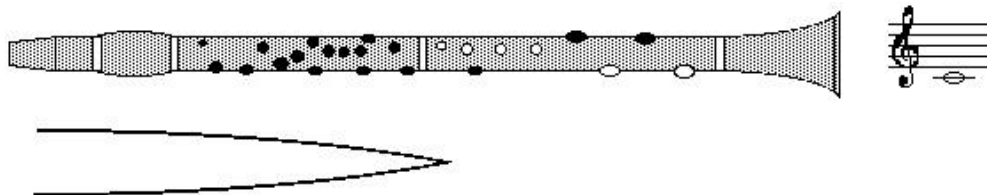
Uz upravljanje protokom zraka, jezičak ima dodatnu ulogu u akustici klarineta. Odmiče se od usnika s porastom tlaka (i obrnuto), čime efektivno mijenja volumen usnika. Posljedica toga je djelomično snižavanje frekvencije rezonancije instrumenta. Meki jezičci se mogu više gibati pa je efekt izraženiji nego kod tvrdih jezičaka. Također, izraženiji je na višim frekvencijama, što može utjecati na intonaciju.

4.2.3. Registri i spektar klarineta

Kod tihog sviranja zvuk klarineta sliči sinusnom valu, ali s porastom glasnoće sličnost sinusnu se smanjuje i broj harmonika raste. Tako se određeni ton sastoji od vibracija na osnovnoj frekvenciji (f_0), ali i višim harmonicima ($3f_0$, $5f_0$ itd.). Cijev klarineta nije potpuno cilindrična nego blago konična ili stepenasta. Također, nije u potpunosti zatvorena na jednom kraju (usnik) i ima proširenje na dnu (zvono). Iz tog razloga se u zvuku klarineta mogu naći i parni harmonici.

Prikaz frekvencija od kojih se zvuk sastoji naziva se *zvučni spektar*. U najnižem, *šalmaj* registru dominiraju neparni harmonici, što mu daje karakterističan "šuplji" zvuk. Od e^1 do b^1 parni harmonici su prisutniji. Ovaj dio opsega klarineta naziva se *grleni* registar, a tonovima koji mu pripadaju je zbog slabije rezonantnosti relativno lako promijeniti intonaciju. Od tona h^2 naviše otvorena je rupa za prepuhivanje te je boja drukčija, svijetla i jasna. Taj registar naziva se *clarino*. Kod najvišeg, *altissimo* registra (tonovi od cis^3 naviše) otvorena je i rupa za prstenjak lijeve ruke.

Otvaranjem rupa počevši od dna klarineta čvor zvučnog tlaka pomiče se prema vrhu instrumenta, tj. efektivno se cijev skraćuje. Počevši od zvona, svaka otvorena rupa povisuje ton za polustepen, a nakon otvaranja svih rupa desne ruke dobiveni ton je c^1 (prikazano na slici 4.11).

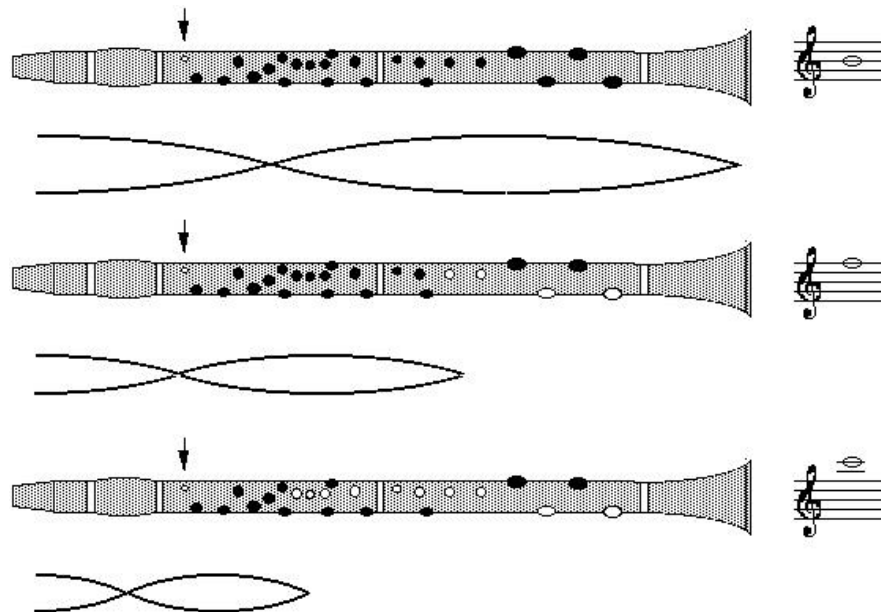


Slika 4.11: Prstomet za c_1 [6]

Ovaj je ton, iako koristi samo pola duljine instrumenta, niži od najnižeg tona flaute (usprkos približno jednakoj duljini cijevi). Jedna od prednosti zatvorene cijevi je mogućnost dobivanja niskih tonova s kraćom cijevi. Prva otvorena rupa predstavlja "izlaz" iz instrumenta za zrak, pa se postiže efekt kao da je na tom mjestu kraj klarineta. Takva aproksimacija nije potpuno točna jer se val širi i u određenom dijelu instrumenta nakon te rupe. Ta pojava naziva se *efekt kraja* (eng. end-effect) i ovisi o frekvenciji tona.

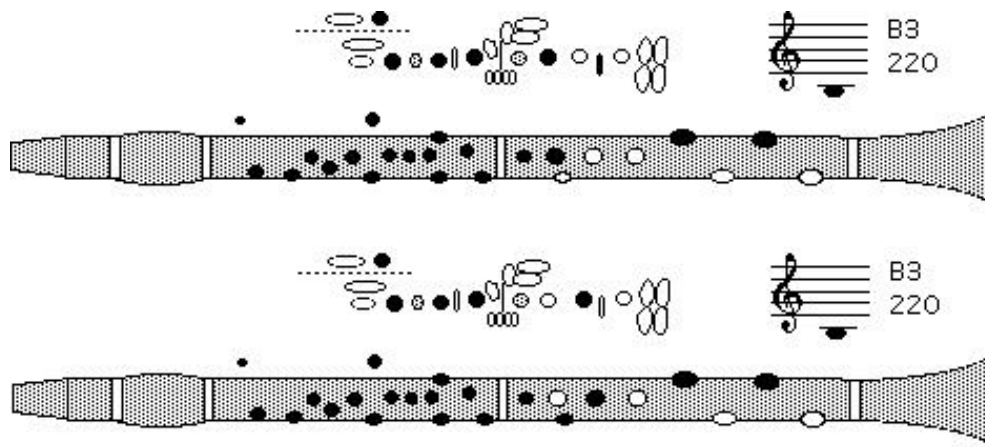
Kada bi klarinet bio potpuno cilindrična cijev, intervali među registrima bi zbog većeg efekta kraja za više frekvencije bili "preuski". Za izjednačavanje odnosa tonova služe oblik usnika, povećanje gornjeg dijela provrta i postupno širenje prema dnu klarineta, zaključno sa zvonom.

Dobivanje viših tonova postiže se otvaranjem rupe na odgovarajućem mjestu. U idealnom slučaju rupa bi se trebala nalaziti na mjestu maksimalnog tlaka nižeg tona i minimalnog tlaka višeg tona (tako da se otvaranjem rupe onemogući nastajanje nižeg tona), kao npr. na slici 4.12. Međutim, tonovi gornjeg registra imaju čvorove na različitim mjestima pa bi takav klarinet imao prevelik broj rupa. Iako rupa za prepuhivanje nije na idealnom mjestu za sve tonove (previsoko za h^1 i prenisko za c^3 na slici 4.12), zbog malih dimenzija ona neće previše utjecati na više harmonike već samo na osnovni ton, što je i cilj.



Slika 4.12: Promjena tona na klarinetu [6]

Budući da klarinet prepuhuje duodecimu, potrebno je 18 rupa za dobivanje svih tonova (prije upotrebe rupe za prepuhivanje). Međutim, svirač koristi "samo" 9 prstiju za sviranje (palac desne ruke služi za oslanjanje klarineta). Zbog toga se na klarinetu nalazi sustav tipki i poluga za istovremeno pokrivanje dvaju ili više rupa pokretom jednog prsta. Za neke tonove postoji više mogućih prstometi (poput za ton h na slici 4.13). Prstometi kod kojih se zatvara rupa koja se nalazi ispod prve otvorene (gledajući od vrha) nazivaju se *ukrštenima* (engl. cross fingering). Takav prstomet je prikazan na donjem dijelu slike 4.13.



Slika 4.13: Dva prstometa za ton h [6]

Valovi nižih frekvencija ne putuju dalje od prve otvorene rupe jer ona izgleda kao "kratki spoj" prema vanjskom zraku - skraćena je efektivna duljina cijevi. Međutim, da bi se val širio kroz rupu potrebno je da zatitra masu zraka u okolini. Kod visokih frekvencija nema dovoljno vremena za to unutar jednog ciklusa pa se valovi viših frekvencija šire duž instrumenta i nakon prve otvorene rupe. Što je frekvencija viša, to će se val širiti dalje niz cijev, a val dovoljno visoke frekvencije proći će duž cijele cijevi. Tako niz otvorenih rupa u prstometu služi kao visokopropusni filter, tj. propušta samo tonove viših frekvencija - u tom slučaju ne dolazi do refleksije i ne nastaje stojni val, odnosno zvuk. Frekvencija nakon koje će svi valovi biti propušteni naziva se *granična frekvencija* (eng. cut-off frequency), a njome je određena frekvencija najvišeg tona koji se može dobiti na klarinetu. Uz to, na klarinetu je moguće proizvesti samo tonove čija je frekvencija manja od vlastite frekvencije jezička.

Svirač može mijenjati graničnu frekvenciju, što se koristi kod *glissanda* (npr. početak *Rapsodije u plavom* G. Gershwin). Postepenim klizanjem prsta s rupe postiže se glatka promjena efektivne duljine, a time i intonacije. Međutim, u nekim registrima potrebno je djelomičnim pokrivanjem rupa "spustiti" graničnu frekvenciju ispod frekvencije tona koji nastaje. Time se znatno oslabljuje rezonancija instrumenta, a ulogu rezonatora "preuzima" vokalni trakt. Nastali ton će pratiti rezonanciju vokalnog trakta koju svirač može glatko mijenjati, a za postizanje *glissanda* potrebno je i mijenjati vlastitu frekvenciju jezička postepenom promjenom pritiska.

5. Eksperimentalni rezultati

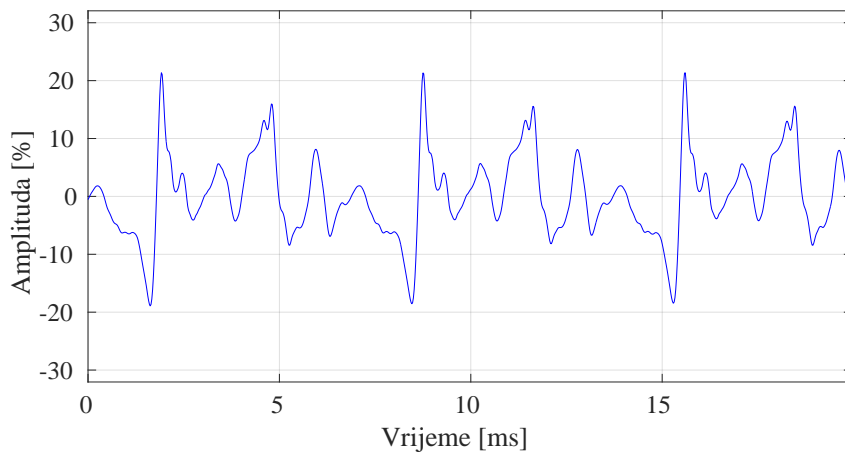
U ovom poglavlju bit će prikazani zvukovi klarineta snimani na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Snimanja su izvršena u tzv. *gluhoj sobi*, sobi koja upija gotovo sav zvuk kako refleksije ne bi utjecale na snimanje "izvornog" zvuka. Kod zvukova se mogu promatrati njihov valni oblik u vremenskoj domeni i njihov frekvencijski spektar u frekvencijskoj domeni.

Valni oblik prikazuje razinu zvuka u vremenu i periodičan je (ponavlja se) za tonove, tj. zvukove kojima je moguće odrediti frekvenciju (za razliku od šumova i udaraca). Amplituda je izražena u postocima u odnosu na maksimalnu amplitudu signala koju analogno-digitalni pretvarač u mikrofону može "podnijeti".

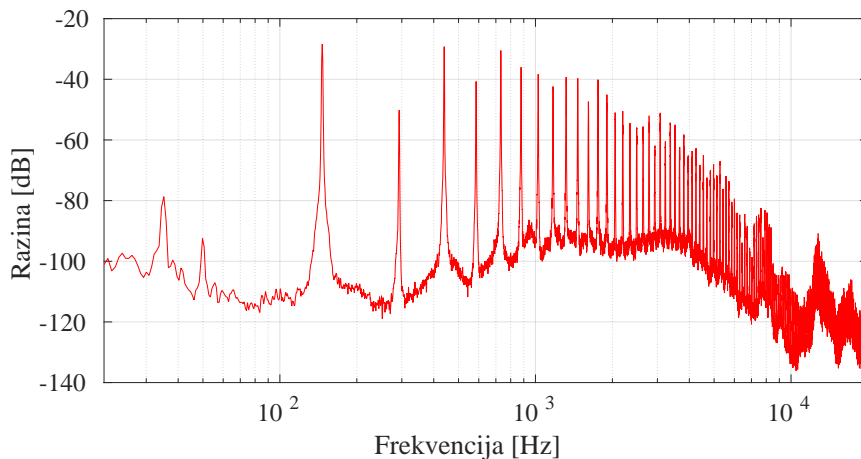
Frekvencijski spektar prikazuje frekvencije i razine u decibelima (dB) svih komponenti (aliquota) koje zvuk sadrži. Iskazivanje u decibelima logaritamski je način izražavanja omjera, a koristan je zbog velikog omjera veličina koje je potrebno prikazati: omjer najglasnijeg i najtišeg zvuka koje čovjek može čuti je preko 1 000 000 : 1, što odgovara razlici od 120 dB. Frekvencijski opseg na horizontalnoj osi grafova u nastavku ograničen je na ljudsko čujno područje (20 Hz - 20 kHz). Osim harmonika snimljenog tona prikazanih u obliku izraženih vrhova, na grafovima se može vidjeti i utjecaj šuma na mjerenje. Šum može biti uzrokovan strujanjem zraka prilikom sviranja, ali i ograničenjima mikrofona, električnom strujom u vodovima (vrh na 50 Hz) ili pozadinskom bukom. Razina šuma na grafovima je uglavnom ispod -80 dB.

5.1. Frekvencijski opseg

Klarinet ima frekvencijski opseg od gotovo 4 oktave, najveći među puhačkim instrumentima. Na slikama 5.1 i 5.2 prikazani su valni oblik i frekvencijski spektar tona *e*, najnižeg tona na klarinetu. Frekvencija tog tona je oko 147 Hz, a period 6.8 ms, što se slaže s grafom na slici 5.1 - valni oblik je periodičan i ponavlja se otprilike svakih 7 ms. Na slici 5.2 može se vidjeti da ton sadrži mnogo alikvota pa njegov valni oblik unatoč periodičnosti ne sliči sinusu.



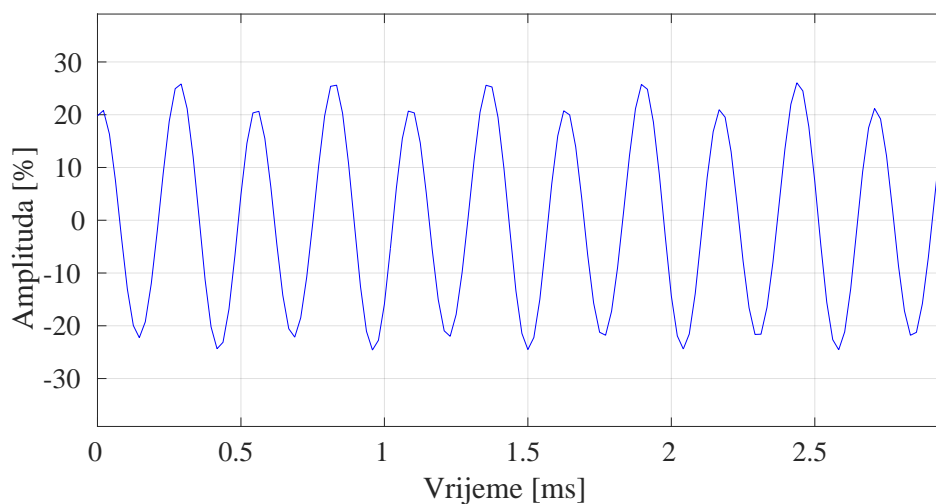
Slika 5.1: Valni oblik tona *e*



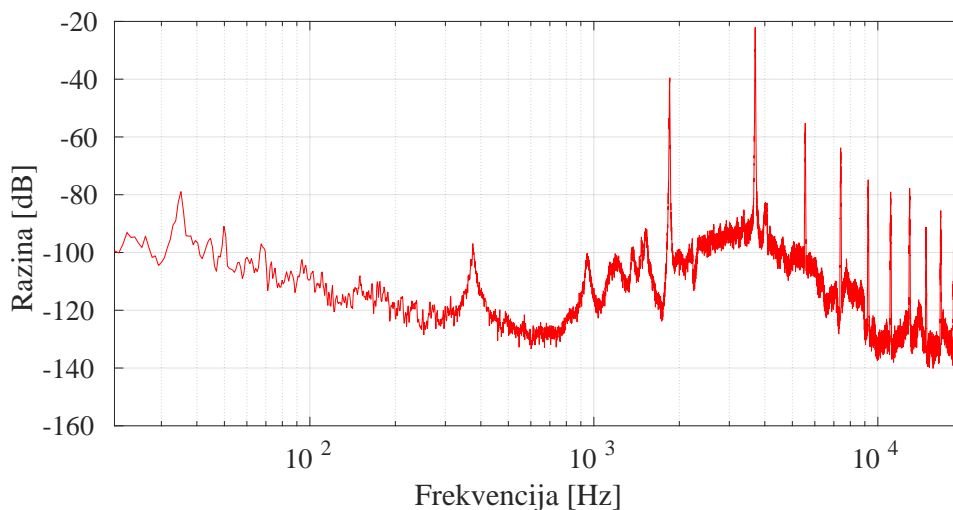
Slika 5.2: Frekvencijski spektar tona *e*

Na slici 5.2 vidljiva je i karakteristika klarineta kao poluotvorene cilindrične cijevi: kod sviranja najnižeg tona sve su rupe pokrivene i klarinet je najbliži cilindru zatvorenom na jednom kraju. Iz tog razloga 2. i 4. alikvot slabiji su od 3. i 5. (osnovni harmonik odgovara prvom vrhu nakon 10^2 Hz, razine oko -30 dB).

Na slikama 5.3 i 5.4 nalaze se valni oblik i frekvencijski spektar tona c^4 , jednog od najviših tonova na klarinetu. Njegova frekvencija je oko 2 kHz, a period oko 0.5 ms. Ponovno, graf valnog oblika se slaže s pretpostavkom o trajanju jednog ciklusa.



Slika 5.3: Valni oblik tona c^4

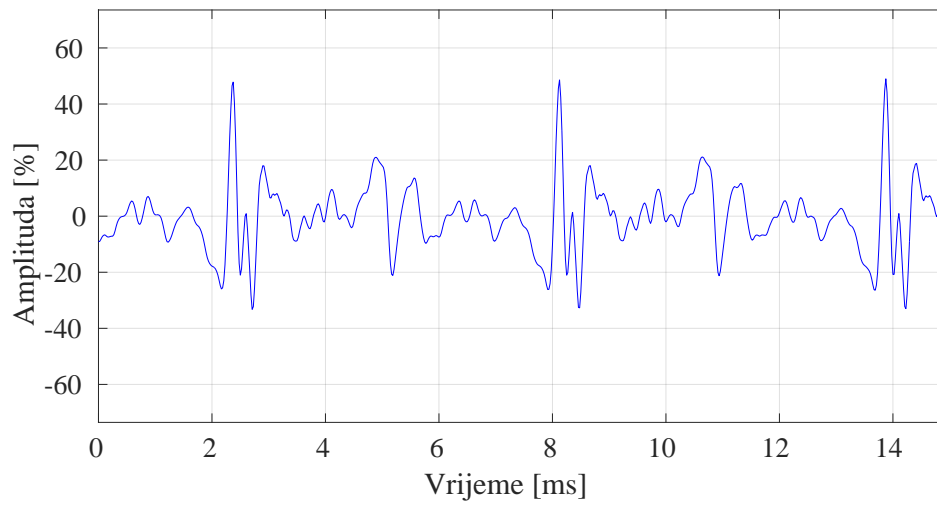


Slika 5.4: Frekvencijski spektar tona c^4

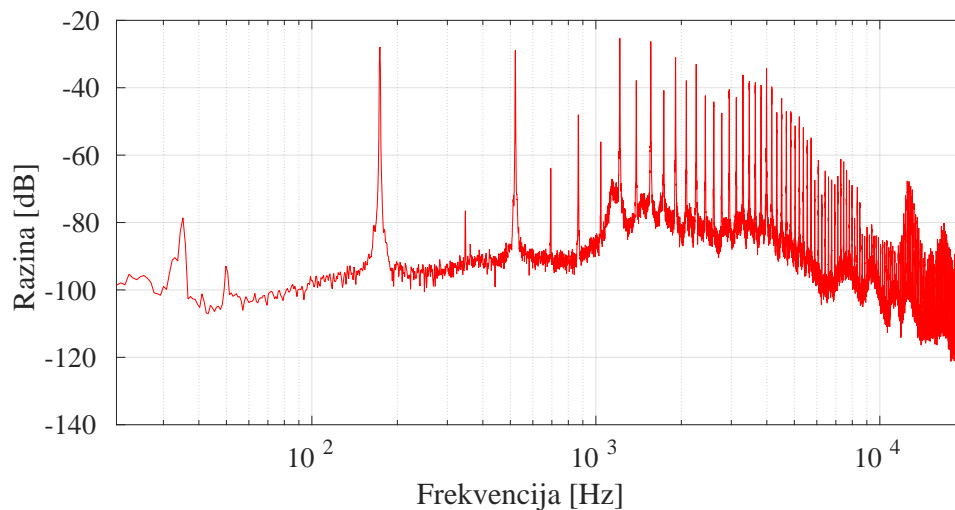
Na slici 5.4 može se vidjeti da taj ton na klarinetu sadrži manji broj viših komponenti (manje je izraženih vrhova u odnosu na npr. sliku 5.2) pa će valni oblik biti sličniji sinusu, a zvuk "čišći". Također, prvi harmonik (frekvencije 4 kHz) je glasniji od osnovnog pa ton zvuči "pištavo".

5.2. Dinamički opseg

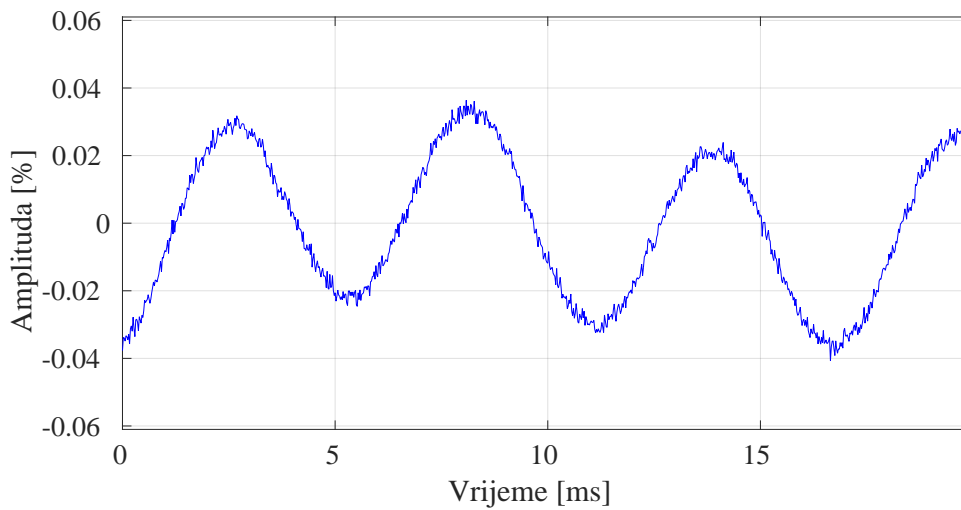
Još jedna specifičnost klarineta je njegov velik dinamički opseg. Kao što je spomenuto u poglavlju o nastanku zvuka na klarinetu, moguće je postići vrlo tihe dinamike kod kojih je valni oblik tona sličan sinusu, a frekventijski spektar sadrži vrlo malo komponenti. S druge strane, kod glasnog sviranja valni oblik je izobličen, a frekventijski spektar sadrži velik broj komponenti.



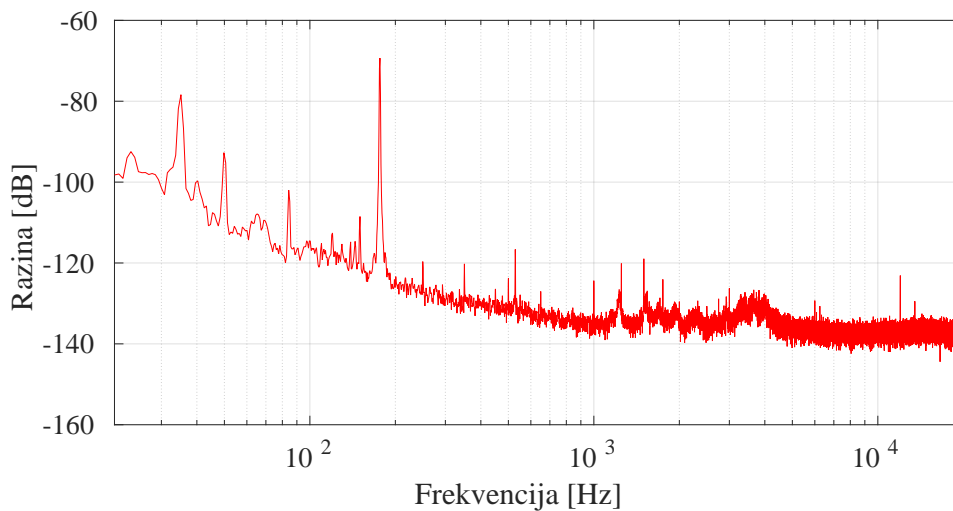
Slika 5.5: Valni oblik tona *g* prilikom glasnog sviranja



Slika 5.6: Frekventijski spektar tona *g* prilikom glasnog sviranja



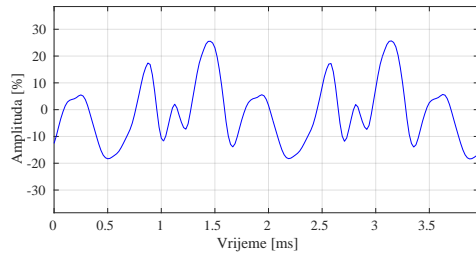
Slika 5.7: Valni oblik tona *g* prilikom tihog sviranja



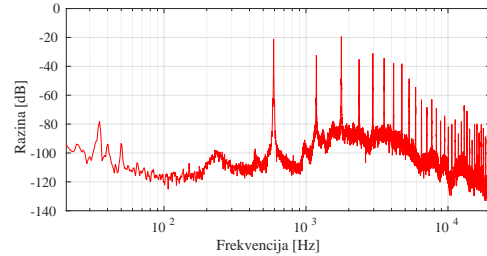
Slika 5.8: Frekvencijski spektar tona *g* prilikom tihog sviranja

Na slikama 5.5 i 5.7 je jasno vidljiva razlika u valnim oblicima, a na slikama 5.6 i 5.8 i razlika u broju i razini komponenata frekvencijskog spektra. Na slici 5.6 ponovno se može vidjeti razlika u razini parnih i neparnih alikvota kod klarineta, a na slici 5.8 i ekstremna dinamika izvediva na klarinetu: razina osnovnog harmonika desetak je decibela viša od one šuma u gluhoj sobi frekvencije oko 35 Hz uzrokovano ventilacijom, prometom itd. Također, razlika između razine tona prilikom glasnog i tihog sviranja iznosi 53 dB.

Navedene razlike prikazane su i na slikama 5.9 i 5.10, a razlika u razini zvuka u ovom slučaju iznosi oko 60 dB.

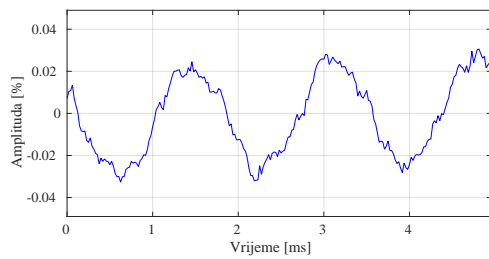


(a) Valni oblik

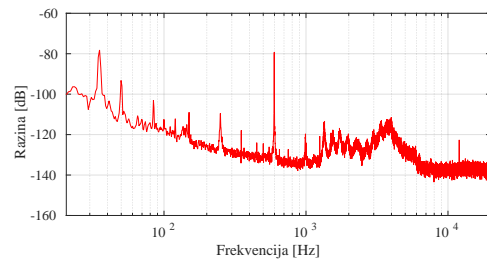


(b) Frekvencijski spektar

Slika 5.9: Prikaz tona e^2 prilikom glasnog sviranja



(a) Valni oblik

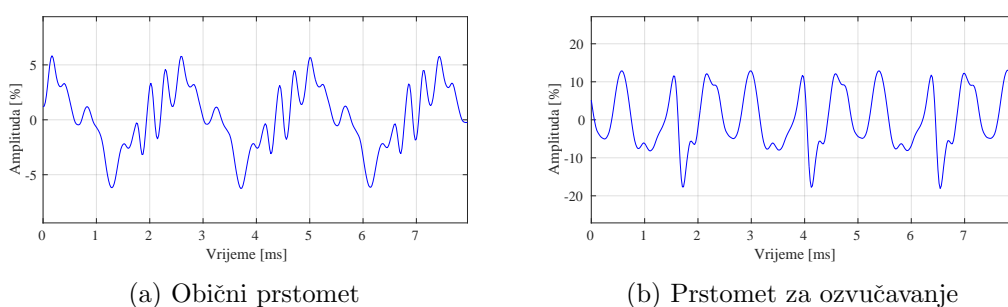


(b) Frekvencijski spektar

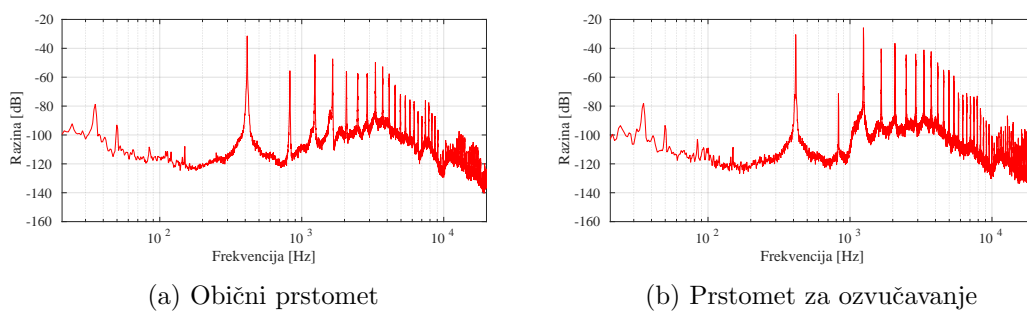
Slika 5.10: Prikaz tona e^2 prilikom tihog sviranja

5.3. Prstomet za ozvučavanje

U grlenom registru klarineta tonovi nemaju vrlo dobre karakteristike pa se često koriste prstometi za ozvučavanje, tj. zatvaraju ili otvaraju dodatne rupe na instrumentu. Na slici 5.11 prikazani su valni oblici tona b^1 s običnim prstometom i prstometom za ozvučavanje. Razlikuju se u iznosu amplitude i samom obliku, ali bitnija je razlika u frekvencijskom spektru vidljiva na slici 5.12: iako je razina drugog harmonika snižena upotrebom prstometa za ozvučavanje, razina ostalih harmonika je povećana, što rezultira punijim zvukom.



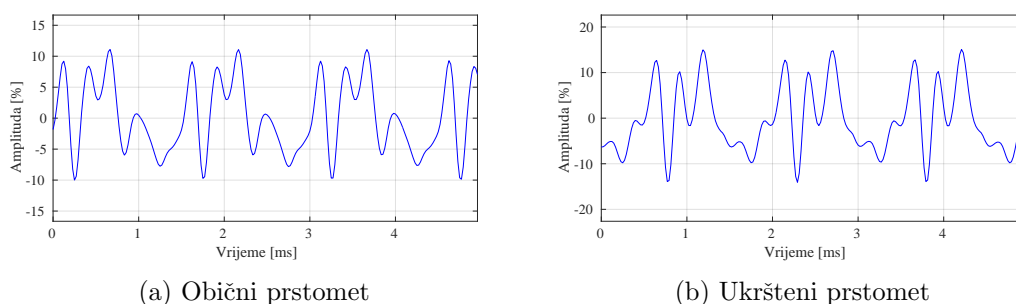
Slika 5.11: Valni oblik tona b^1



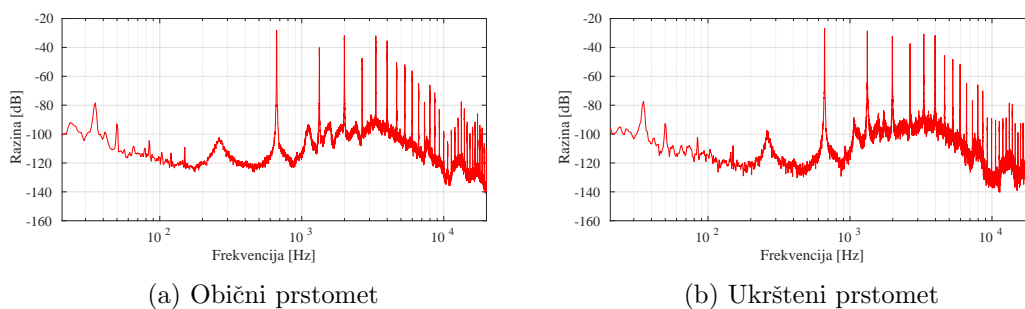
Slika 5.12: Frekvencijski spektar tona b^1

5.4. Ukršteni prstomet

Ukršteni prstometi objašnjeni su na kraju četvrtog poglavlja, a na slikama 5.13 i 5.14 prikazana su svojstva tona fis^2 uz upotrebu običnog i ukrštenog prstometa. Iako su prstometi različiti, nema značajne razlike između dobivenih tonova (sudeći prema grafovima). S druge strane, u praksi postoje situacije kada će jedan od tih prstometa imati prednost radi spretnosti, izjednačavanja zvuka s ostalim tonovima itd. S prikazanih grafova može se zaključiti da je konstrukcijsko rješenje ispravno te da se ukršteni prstometi mogu koristiti ravnopravno s običnima.



Slika 5.13: Valni oblik tona fis^2



Slika 5.14: Frekvencijski spektar tona fis^2

Rezultati prikazani od poglavlja 5.1 do 5.4 slažu se s teorijom: sviranjem vrlo tihom dinamikom moguće je postići da zvuk klarineta bude vrlo sličan čistom sinusnom tonu i sadrži vrlo mali broj komponenata. S druge strane, glasnijim sviranjem zvuk klarineta sastoji se od sve više komponenata i ima više "boje". Karakteristika klarineta zbog njegovog oblika je da su neparni harmonici izraženiji od parnih. Koristeći alternativne prstomete moguće je poboljšati svojstva tonova koji su zbog praktičnih (odnosno konstrukcijskih) ograničenja slabije rezonantnosti ili projekcije.

6. Zaključak

U ovom radu ukratko je predstavljena povijest razvoja klarineta, a zatim i osnove fizike valova kao teorijska podloga za proučavanje njegove akustike. Zatim je objašnjena akustika puhačkih instrumenata te detaljnije razmotren klarinet kao jedinstveni puhački instrument sličan poluotvorenoj cilindričnoj cijevi. Opisane su neke od osobina klarineta koje su zatim i potvrđene eksperimentalnim rezultatima, odnosno zvučnim zapisima.

Akustičke osobine klarineta su široko područje, a ovaj rad je svojevrstan uvod u tu temu. Postoji mnogo opcija za daljnje razmatranje: konstrukcijske i intonativne specifičnosti, materijali za izradu klarineta, subjektivni dojmovi instrumenata različitih proizvođača ili razdoblja, srodni instrumenti i njihova upotreba itd.

Također, vrlo je bitno razmotriti i praktične aspekte sviranja klarineta. Iako postoji literatura sa savjetima o odabiru, održavanju i sviranju klarineta, mnogi korisni savjeti mogu se dobiti u razgovoru s iskusnim klarinetistima. Za što bolje ovladavanje instrumentom potrebno je konstantno proširivati znanje i stjecati iskustvo njegovom praktičnom primjenom.

LITERATURA

- [1] Neville H. Fletcher i Thomas D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer, 1998.
- [2] Donald E. Hall. *Musical Acoustics*. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2002.
- [3] Kristian Jambrošić, FER, Zagreb. Glazbena akustika - bilješke s predavanja. https://www.fer.unizg.hr/muza/glak#%23!p_rep_75458!_-140561. [Datum pristupa: 20.3.2018.].
- [4] Grove Music Online. Clarinet. <http://www.oxfordmusiconline.com/grovemusic/view/10.1093/gmo/9781561592630.001.0001/omo-9781561592630-e-0000052768>. [Datum pristupa: 12.3.2018.].
- [5] Joe Wolfe, UNSW (Sydney, Australija). What is acoustic impedance and why is it so important? <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/z.html>. [Datum pristupa: 11.5.2018.].
- [6] Joe Wolfe, UNSW (Sydney, Australija). Introduction to clarinet acoustics. <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html>. [Datum pristupa: 15.4.2018.].
- [7] Joe Wolfe, UNSW (Sydney, Australija). How do woodwind instruments work? <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/woodwind.html>. [Datum pristupa: 31.3.2018.].