



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Akustičke osobine slovačkog nacionalnog muzičkog instrumenta – FUJARA

- diplomski rad -

Mentor:

prof. dr. Srđan Rakić

Kandidat:

Branislav Kovač

Novi Sad, 2016

Zahvaljujem se

dr Srđanu Rakiću, redovnom profesoru Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, mentoru, na korisnim sugestijama i predlozima prilikom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se i mojoj porodici koja je imala razumevanja, strpljenja i davala mi podršku.

U Novom Sadu, 2015.godine

Keď ho vše dojal osud človečí
a nebolo mu potom do reči,
tu zoťal bazu.

Tichý trošíčku,
vytriasol z nej krehkú dušičku
a pomaľoval zvonku útly strom,
ako si ženích zdobí vlastný dom,
a oprášiac si z hlíny kolená,
sám seba potom vložil do kmeňa
a ostal v ňom...

Kráľ z krvi otrokov
a jeho dych s horou širokou
tak uhrančivo niesol do dialí,
že sa mu nemé skaly ozvali.

Pomkni sa milá, ohník dohára,
ej, fujarôčka moja, fujara.
Pomkni sa milá, ohník dohára!
Ej, fujarôčka moja fujara.

Milan Rúfus

Sadržaj	strana
1. UVOD	3
2. MEHANIČKI TALASI	4
2.1 Vrste talasa	4
2.2 Talasni front	5
2.3 Karakteristike talasa	5
2.4 Brzina prostiranja talasa	6
2.4.1 Brzina prostiranja u raznim sredinama	6
2.4.2 Brzina prostiranja u vazduhu	7
2.5 Jednačina progresivnog talasa	10
2.6 Interferencija (sabiranje) talasa	13
2.7 Odbijanje talasa	14
2.8 Stojeći talasi	14
3. ZVUK	17
3.1 Uvod	17
3.2 Karakteristike zvuka	17
3.2.1 Podela zvuka	18
3.2.2 Karakteristike tonova	19
3.2.3 Izvori zvuka	19
3.3 Treperenje vazдушnih stubova	19
3.3.1 Stojeći talasi u cevi otvorenoj sa jednog kraja	19
3.3.2 Stojeći talasi u cevi otvorenoj sa oba kraja	21
4. SLOVAČKI NACIONALNI DUVAČKI INSTRUMENT – FUJARA	25
4.1 Karakteristike fujare kao muzičkog instrumenta	25
4.2 Konstrukcija fujare	25
4.3 Formiranje zvuka u fujari	26
4.4 Izrada instrumenta	27
4.5 Ukrašavanje i zaštita	30
4.6 Osnove tehnike sviranja	31
5. ZAKLJUČAK	33
6. LITERATURA	34

UVOD

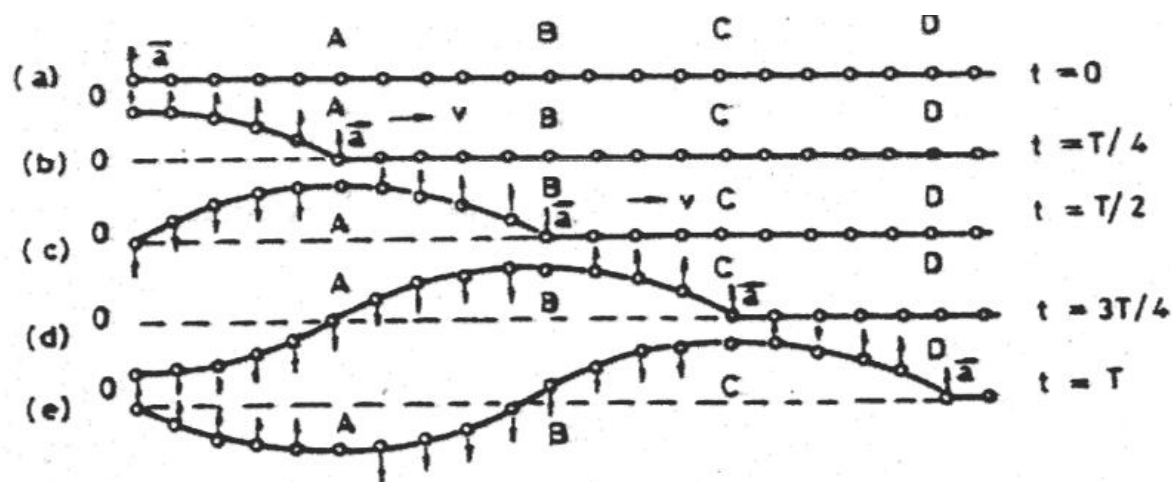
Ovaj rad je nastao kao rezultat moje ljubavi prema izradi i restauraciji gudačkih i drvenih duvačkih muzičkih instrumenata. U radu nisam obradio sve osobine i pojave vezane za zvuk, već samo one koje su u funkciji izrade duvačkih muzičkih instrumenata.

U današnje vreme, kada tehnološki razvoj i teorijska znanja civilizacije dobijaju sve veće ubrzanje, neke osnovne vrednosti duhovne kulture, kao što je naprimer muzika, nisu uopšte izgubile na značaju. Upravo taj momenat je imao presudan značaj za izbor teme mog diplomskog rada.

Najviše informacija iz spoljašnjeg sveta ljudsko biće prima putem čula vida. Odmah zatim po broju informacija iz okoline, čulo sluha. Ni naša čula nisu dovoljna ako ne umemo da vidimo ili slušamo. Važan je i mozak koji je svestan tih informacija i koji ume da ih na određenom nivou analizira.

2. MEHANIČKI TALASI

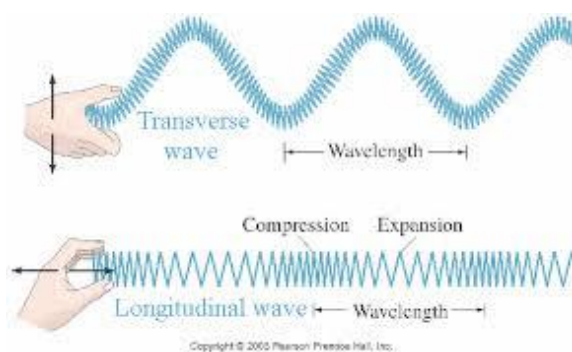
Talas u fizici je prostorno i vremenski promenljivo polje koje prenosi energiju kroz prostor. Mehanički talas je proces prenošenja periodičnog poremećaja posredstvom elastične sredine. Za nastanak mehaničkog talasa potrebno je postojanje izvora – oscilatora i elastične sredine. Čestice koje osciluju ne kreću se sa talasom već ostaju na svojim mestima oscilujući oko svojih ravnotežnih položaja. Kroz prostor se širi poremećaj u obliku mehaničkog talasa čija brzina zavisi od elastičnih osobina sredine i gustine sredine.



Slika 2.1

2.1 Vrste talasa (podela talasa)

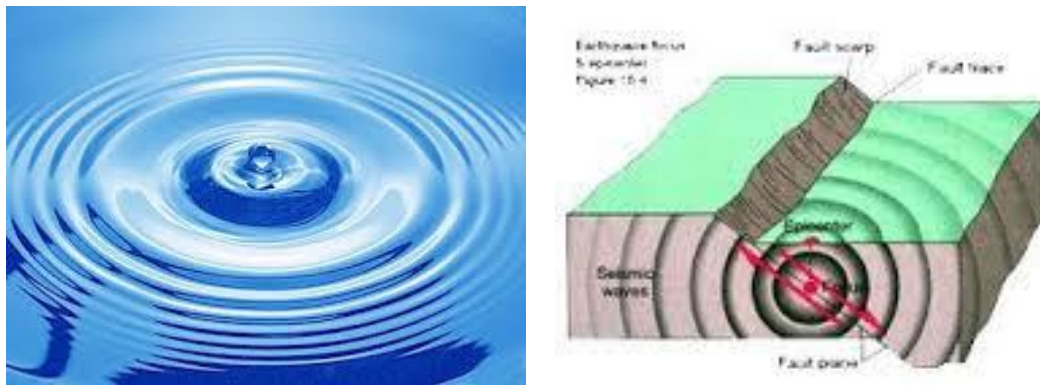
U zavisnosti od **pravca oscilovanja** čestica sredine, talasi mogu da budu transverzalni i longitudinalni.



Slika 2.2

Transverzalni talasi nastaju kada izvor talasa osciluje normalno na pravac prostiranja talasa. Mogu se prostirati kroz čvrsta tela za razliku od longitudinalnih koji se prostiru kroz sredine u sva tri agregatna stanja.

Prema **broju dimenzija** kojima se šire, talasi se dele na jednodimenzionalne (linijske), dvodimenzionalne (površinske) i trodimenzionalne (zapreminske).



Slika 2.3 , a) površinski talasi, b) zapreminski talasi

Prema brzini, talasi se dele na progresivne (putujuće) i stojeće.

2.2 Talasni front

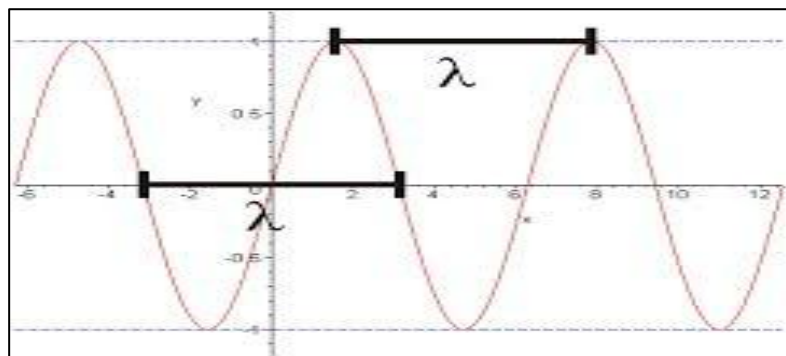
Kada bacimo kamen u vodu uočićemo koncentrične krugove koji se šire sa centrom na mestu upada kamena u vodu. Sve čestice vode na jednom koncentričnom krugu nalaze se u istom stanju kretanja (nalaze se na istom rastojanju od ravnotežnog položaja, imaju istu brzinu i ubrzanje), odnosno kažemo da se nalaze u fazi. Geometrijsko mesto tačaka gde se nalaze te čestice čini talasni front. Ako je sredina kroz koju se talas prostire uniformne gustine pravac prostiranja talasa je normalan na talasni front. Linija normalna na talasni front koja ukazuje na pravac prostiranja talasa naziva se zrak. Prema obliku talasnog fronta razlikujemo: ravanske, sferne i cilindrične talase. Na slici 2.3 vide se talasni frontovi površinskih i sfernih talasa.

2.3 Karakteristike talasa

Slično kao i kod oscilovanja i kod talasa možemo definisati karakteristične veličine. Nabrojaćemo:

Period oscilovanja je vreme u toku kojeg se izvrši jedna oscilacija delića sredine. Označavamo sa T a jedinica je sekunda s .

Frekvencija predstavlja broj oscilacija u jedinici vremena. Jednaka je recipročnoj vrednosti perioda oscilovanja. $\nu = \frac{1}{T}$. jedinica frekvencije je $Hz = s^{-1}$.



Slika 2.4

Talasna dužina – najbliže rastojanje između dve tačke koje se nalaze u istom stanju oscilovanja, označavamo sa λ a izražena je u metrima m .

Brzina talasa je povezana sa frekvencijom i talasnom dužinom $c = \lambda \cdot \nu$.

2.4 Brzina prostiranja talasa

2.4.1 Brzina prostiranja u raznim sredinama

Brzinu prostiranja mehaničkog talasa razmatramo na modelu kuglica-delića koji su međusobno povezani elastičnim oprugama. Brzina kojom se prenosi poremećaj duž linije međusobno povezanih delića zavisiće od dva faktora :

- **masa delića** : - utiče na brzinu prostiranja poremećaja jer zbog inercije većoj masi će trebati duže vreme kako bi se pokrenula ili zaustavila. U realnim sredinama gustina određuje efektivnu masu. Veća gustina daje veću efektivnu masu pa zato i poremećaj sporije putuje.

- **jačina opruge** : ona takođe utiče na prenošenje poremećaja tako što će jača opruga biti u stanju da jače gura sledeću lopticu i daje joj veće ubrzanje. U realnim materijalima jačinu opruge možemo porediti sa modulom elastičnosti, odnosno sa Young-ovim modulom elastičnosti kod čvrstih tela. Što je veća vrednost modula elastičnosti neke sredine to je i veća tvrdoća opruge pa će se poremećaj prenositi sa većom brzinom.

Za longitudinalne talase u čvrstim telima, brzina prostiranja poremećaja zavisi samo od Young-ovog modula i gustine, pa je možemo predstaviti jednostavnom relacijom:

$$c = \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}$$

gde je ν – brzina izražena u m/s , ρ - gustina izražena u kg/m^3 , E_y – Young-ov modul elastičnosti izražen u N/m^2 .

Međutim, gustina čvrstih tela ne zavisi od pravca ali to ne mora uvek da bude slučaj. Tako na primer u mesingu je vrednost Young-ovog modula identična u svim pravcima jer je homogenog sastava, dok je kod drveta on različit u pravcu pružanja vlakana i pravcu poprečnom na vlakna drveta. Stoga, mesing, i drugi metali, će prenositi poremećaj nezavisno od pravca istom brzinom, dok će u drvetu postojati različite brzine uzdužnog i poprečnog prostiranja talasa.

Ovo možemo pokazati na jednostavnom primeru: gustina čelika je 7800 kg/m^3 , a Young-ov modul elastičnosti $E_y = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, pa će brzina iznositi

$$c = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{11} \frac{N}{m^2}}{7800 \frac{kg}{m^3}}} = 5189 \frac{m}{s}$$

gustina drveta bukve je 680 kg/m^3 , a $E_{y \text{ uzdužno}} = 14 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, i $E_y = 0.88 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

$$c_{uzdužno} = \sqrt{\frac{14 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}}{680 \frac{kg}{m^3}}} = 4537 \frac{m}{s}$$

$$c_{poprečno} = \sqrt{\frac{0,88 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}}{680 \frac{kg}{m^3}}} = 1138 \frac{m}{s}$$

Ovakve varijacije u brzini zvuka u materijalima, kao što je drvo, itekako utiču na akustiku drvenih muzičkih instrumenata, kao i posebne implikacije pri dizajnu zvučnih kabineta. Proizvođači zvučnih kutija zato najčešće koriste pločaste materijale od prerađenog drveta kao što su šperploče, iverica ili MDF kod kojih je Yung-ov modul nezavisan od pravca.

2.3.2 Brzina talasa u vazduhu

Do sada smo razmatrali samo zvuk u čvrstim telima. Ipak, zvukom smatramo treperenje koje se prostire vazduhom, što je za ljudski govor ili muziku uobičajena sredina kroz koju se prostire. Nažalost, vazduh nema Young-ov modul elastičnosti pa stoga moramo primeniti drugačiji pristup. Vazduh je elastičan, stišljiv, a to navodi da u njemu mora postojati neka ekvivalentna veličina Young-ovom modulu.

Brzina zvuka u vazduhu odnosno u bilo kom gasu, zavisi od fizičkih osobina sredine. Pomeranje određenog zapreminskog elementa vazduha prilikom prolaska zvučnog talasa pokorava se drugom Njutnovom zakonu: $F = m \cdot a$. Za element mase dm pišemo kao

$$dF = dm \cdot a$$

Međutim, na izabrani element mase deluje samo okolni vazduh. U statičkom stanju, bez zvučnog talasa, je ukupna rezultujuća sila jednaka nuli. Prilikom prolaska zvučnog talasa bočne komponente sila se ne poništavaju zato što pritisak nije svuda jednak. Kada bi nekim detektorom ustanovili raspodelu pritiska duž izabrane ose x u nekom trenutku vremena, dobili bi harmonijsku raspodelu pritiska $p(x)$. Pritisak bi se od mesta do mesta menjao. Sile pritiska na prednju i zadnju stranu izabranog elementa u obliku kvadra bile bi različite.

Sile u elastičnoj sredini zavise od deformacija. Situacija pri deformaciji vazdušnog stuba je do određene mere slična situaciji uzdužne deformacije elastične šipke (deformacije na istezanje). Za deformaciju istezanjem elastične šipke važi Hukov zakon:

$$\frac{F}{S} = E_y \frac{\Delta l}{l}$$

gde je E_y Jungov modul elastičnosti, $\frac{F}{S}$ - mehanički napon, a $\frac{\Delta l}{l}$ relativna deformacija kod izdužavanja šipke.

Prilikom mehaničkog naprezanja gasa (vazduha) važi slično:

$$\frac{F}{S} = K \frac{\Delta V}{V}$$

gde je K modul zapreminske stišljivosti gasa.

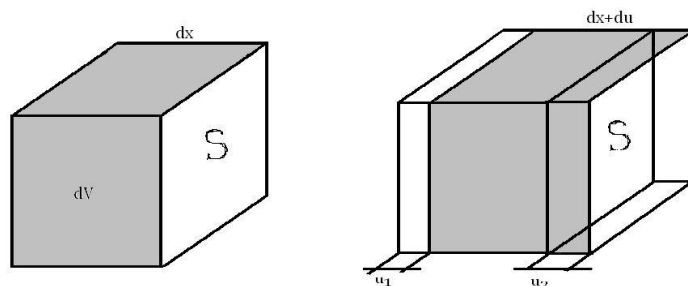
Pri prolasku talasa, element prvobitne zapremine $dV = Sdx$ se deformiše.

Baza br.1 će se pomeriti za dužinu u_1 dok druga baza za dužinu u_2 . rezultujuća dužina elementa jeste:

$$dx + u_2 - u_1 = dx + du$$

Promena dužine elementa zapremine je du a promena zapremine Sdu . Relativna promena zapremine iznosi :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Sdu}{Sdx} = \frac{du}{dx}$$



Slika 2.5

Diferenciranjem izraza za silu:

$$F = KS \frac{\Delta V}{V}$$

odnosno

$$F = KS \frac{du}{dx}$$

dobijamo:

$$dF = KSd \left(\frac{du}{dx} \right)$$

Pošto je $dF = dm \cdot a$, gde je sa dm označena masa gasa u elementu zapremine, dobijamo:

$$dm \cdot a = KSd \left(\frac{du}{dx} \right)$$

S druge strane je $dm = \rho dV = \rho Sdx$, a ubrzanje

$$a = \frac{d^2u}{dt^2}$$

Sledi

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{K}{\rho} \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right)$$

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{K}{\rho} \frac{d^2u}{dx^2}$$

Dobili smo jednačinu koja liči na talasnu diferencijalnu jednačinu u kojoj koeficijent $\frac{K}{\rho}$ predstavlja kvadrat brzine talasa. Odatle je:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Dakle, brzina zvuka zavisi od modula zapreminske stišljivosti vazduha (gasa). Moramo postaviti pitanje da li se ovde radi o izotermskoj ili adijabatskoj stišljivosti? Kod gasova to treba razlikovati. Odgovor zavisi od toga kakav se proces odvija prilikom prostiranja zvučnog talasa kroz gas. Na prvi pogled može da se čini da je reč o izotermnom procesu. Naprimera, zvuk radija u sobi se prostire kroz vazduh pri datoj temperaturi. Rezultat brzine zvuka pri ovakvoj pretpostavci bio bi manji od eksperimentalno izmerenog. U stvarnosti se u vazduhu dešavaju vrlo brze promene zapremine i pritiska, koje dovode do promene temperature u malim zapreminama. Na mestima povećanog pritiska vazduh se zagreva a na mestima razređenja, hladi. Ova mesta zbog velike brzine promena, ne stižu da izjednače temperature sa okolinom. Zato smatramo da je proces prostiranja zvuka adijabatski.

Da bi odredili adijabatski modul zapreminske stišljivosti polazimo od Poasonove jednačine za adijabatski proces:

$$p \cdot V^\gamma = \text{const.}$$

Gde je $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ odnos molarnih toplotnih kapaciteta pri stalnom pritisku i stalnoj zapremini.

Diferenciranjem jednačine adijabate dobijamo:

$$dp \cdot V^\gamma + p \gamma V^{\gamma-1} dV = 0$$

Deljenjem poslednje sa V^γ :

$$dp + p \frac{p}{V} \gamma dV = 0$$

I sređivanjem:

$$p\gamma \frac{dV}{V} = -dp$$

Odakle je

$$\frac{1}{dp} \frac{dV}{V} = -\frac{1}{p\gamma}$$

A pošto je adijabatski modul zapreminske stišljivosti

$$K = -\frac{V dp}{dV}$$

(znak minus potiče od toga što smanjenu zapreminu odgovara povećanje pritiska)

onda je

$$K = \gamma p$$

Ako iskoristimo ovaj rezultat za brzinu zvuka u gasovima, dobijamo:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

Brzina zvuka u gasovima zavisi dakle od Poasonove konstante γ , od pritiska p i gustine gasa ρ . Pošto su kod gasova pritisk, zapremina i temperatura međusobno povezane, može se zaključiti da brzina zvuka mora da zavisi i od ove poslednje. Ovo

možemo lako pokazati ako pretpostavimo da se radi o idealnom gasu za koji važi jednačina stanja:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T$$

Odakle se izražava pritisak

$$p = \frac{\rho}{M} RT$$

Smenom ove poslednje u obrazac za brzinu zvuka dobijamo:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$$

R je gasna konstanta, T- apsolutna temperatura a M- molarna masa gasa. Ako se zamene odgovarajuće vrednosti za γ , R i M ($\gamma = 1,4$, $M_{\text{vazduha}} = 28,7 \frac{g}{mol}$, i $R = 8,31 \frac{J}{mol K}$), dobijamo

$$c = 20,1\sqrt{T}$$

zavisnost brzine zvuka od temperature.

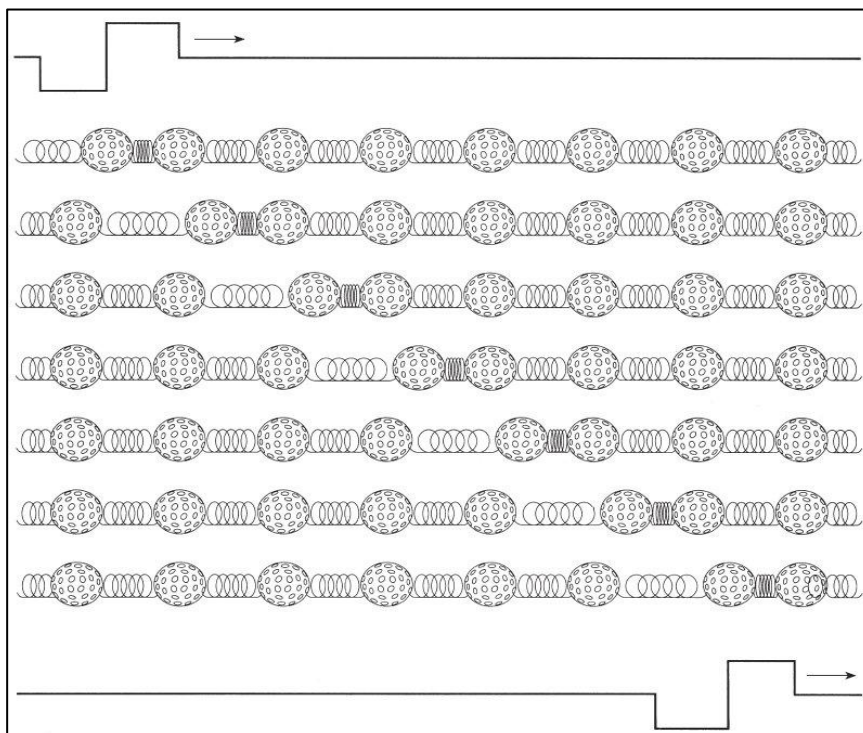
Dakle, za temperaturu vazduha od 20 °C brzina prostiranja zvuka će iznositi

$$c = 20,1\sqrt{273 + 20} = 344 \frac{m}{s}$$

2.5 Jednačina progresivnih talasa (longitudinalnih i transverzalnih)

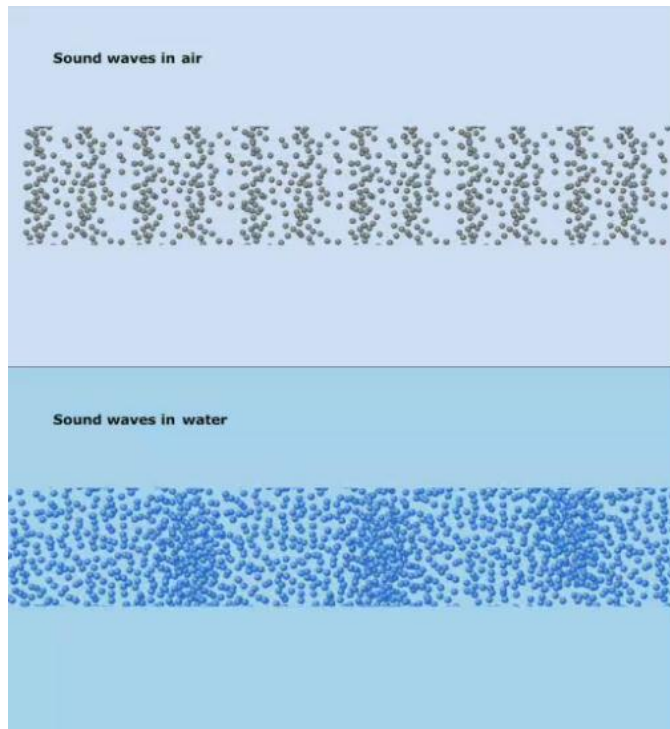
Progresivni talas je onaj talas koji se prostire u celoj, homogenoj sredini bez promene pravca kretanja. Prostiranjem talasa sve tačke elastične sredine se dovode u stanje oscilovanja. Zbog kašnjenja u oscilovanju udaljenijih delića sredine u odnosu na izvor talasa, definiše se jednačina koja opisuje vremensku i prostornu zavisnost elongacije delića elastične sredine a koja se naziva **jednačina progresivnog talasa**.

Razmatrajući jednostavan mehanički model prostiranja talasa kroz neku fizičku sredinu pokazaćemo jednostavni jednodimenzionalni model koji možemo uporediti sa



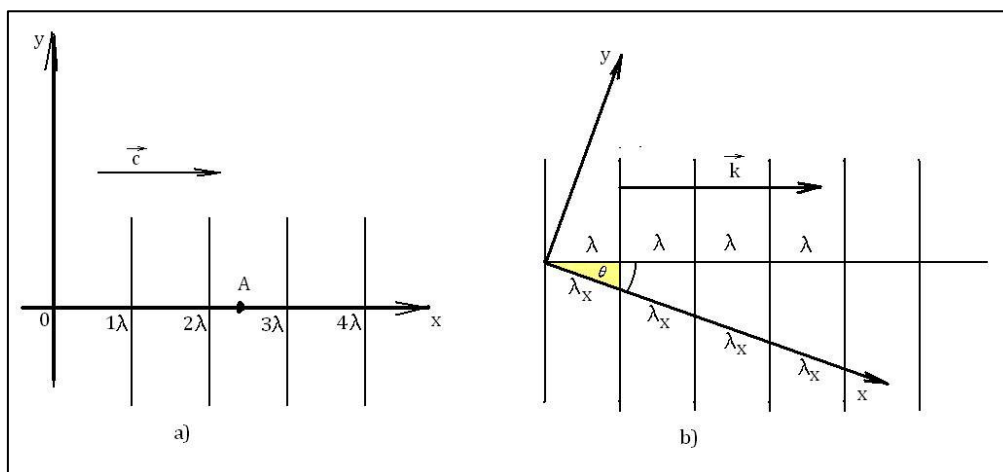
lopticama međusobno povezanim oprugama. Loptice predstavljaju centre masa kojima odgovaraju molekuli u realnoj sredini, dok su oprugama predstavljene međumolekulske interakcije. Ukoliko lopticu na kraju poguramo napred prema sledećoj loptici opruga će se sabiti i pogurati sledeću lopticu u nizu duž pravca kojim su povezane, i.t.d. Zbog mase loptice, biće potrebno neko vreme pre nego što počne kretanje sledeće lopte povezane oprugom. Ovo znači da je potrebno vreme da se pomeraj prve lopte u nizu prenese na drugi kraj. Ako se početna lopta vrati u prvobitan položaj, ceo proces će se ponoviti s tim da će sada opruga biti istegnuta povlačenjem prve lopte unazad. Na kraju će sve loptice zauzeti srednje međusobno rastojanje koje su imale pre nego su pogurane i povučene.

Mesto na kojem su lopte sabijene jedna prema drugoj nazivamo kompresijom dok je mesto sa istegnutom oprugom i udaljenim lopticama razređenost. U realnoj sredini, kao što je vazduh, poremećaj prirodno sadrži oba stanja odnosno kompresovana mesta praćena razređenjem i razređena mesta praćena kompresijom, kako bi se sredina vratila u svoje normalno stanje. Zbog usmerenosti prostiranja poremećaja, loptice bivaju i pogurane i povučene duž pravca prostiranja a ovakav način prostiranja nazivamo longitudinalni talas. Prema tome zvučni talasi su longitudinalni talasi koji se prostiru naizmeničnim kompresovanjem i razređivanjem u materijalnoj sredini kroz koju se prostiru.



Slika 2.7

Dakle kod talasnog kretanja dolazi do prenošenja oscilovanja sa jednog delića na drugi sa određenim zakašnjenjem koje zavisi od mehaničkih svojstava elastične sredine i temperature.



Slika 2.8

Jednačina koja govori o tome da se oscilovanje prenelo iz koordinatnog početka na neko rastojanje duž ose $-x$ sa zakašnjenjem Δt ima oblik:

$$y = y_0 \sin(\omega(t - \Delta t) + \varphi)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{c}, \quad c = \lambda\nu$$

Nakon zamene u prethodnu jednačinu dobijamo:

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - \omega \frac{\Delta x}{c} + \varphi\right)$$

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - 2\pi\nu \frac{\Delta x}{\lambda\nu} + \varphi\right)$$

Nakon skraćivanja

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} + \varphi\right)$$

I na kraju:

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x + \varphi\right)$$

Ako se uzme da je čestica oscilovala po zakonu $\sin\omega t$ u koordinatnom početku u trenutku $t=0$ i radi jednostavnosti neka je $\varphi = 0$, tada dobijamo jednačinu ravnog talasa koji se kreće brzinom c u pozitivnom smeru x - ose:

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

Koeficijent $\frac{2\pi}{\lambda}$ predstavlja talasni broj odnosno broj talasnih dužina na dužini od 2π metara.

Zato obeležavamo: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Shodno tome je:

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

Ova jednačina izračunava trenutnu elongaciju talasa u trenutku t na položaju x na osi x . Ukoliko tražimo elongaciju oscilovanja u proizvoljnoj tački prostora, onda osu x usmeravamo prema toj tački.

Sa slike 2.8 se vidi da je $\frac{\lambda}{\lambda_x} = \cos\theta$, talasni broj u tom pravcu $k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x}$, tada je

$$y = y_0 \sin(\omega t - k_x x)$$

odnosno

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx \cos\theta)$$

u zagradi prepoznavamo skalarni proizvod talasnog vektora i vektora položaja, što je prikazano na slici 2.8 b).

$$y = y_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

Osnovne osobine talasnog kretanja su:

- ✓ Odbijanje (refleksija)
- ✓ Prelamanje
- ✓ Interferencija
- ✓ Difrakcija
- ✓ Polarizacija

Od nabrojanih pojava objasnićemo samo one koje su zanimljive za ovaj rad. Pre prelaska na objašnjenje nekih od nabrojanih pojava, navešćemo bez detaljnog objašnjavanja *princip superpozicije talasa*:

Ako se dva ili više talasa istovremeno prostiru kroz neku sredinu, rezultatna talasna funkcija je jednaka algebarskom zbiru talasnih funkcija pojedinačnih talasa, tj.:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)$$

Dakle, ukupna elongacija na nekom mestu u datom trenutku vremena jednaka je zbiru elongacija pojedinačnih talasa na tom istom mestu i istom trenutku.

2.6 Interferencija (slaganje) talasa

Najčešće se u jednoj sredini nalazi veći broj izvora talasa. Iz svakog izvora se talas prostire nezavisno jedan od drugog u skladu sa svojom talasnom jednačinom, ne utičući pri tome jedan na drugoga. Čestica elastične sredine zahvaćena talasom počinje da osciluje. Ukoliko je izložena dejstvu više talasnih procesa, onda će njeno oscilovanje biti rezultanta uslovljena slaganjem pojedinačnih oscilacija, u skladu sa principom superpozicije. Ovu pojavu nazivamo *interferencija talasa*. Radi ilustracije razmotrimo primer interferencije dva talasa iste amplitude i frekvencije izmedju kojih je fazna razlika φ . Jednačine tih talasa su

$$y_1 = y_0 \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

$$y_2 = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

Koristeći se principom superpozicije

$$y = y_1 + y_2 = [y_0 \sin(\omega t - kx + \varphi) + y_0 \sin(\omega t - kx)]$$

Zaključujemo, da je rezultujući talas iste frekvencije ω

$$y = 2y_0 \sin\left(\omega t - kx + \frac{\varphi}{2}\right) \cos \frac{\varphi}{2}$$

sa amplitudom

$$\mathcal{A} = 2y_0 \cos \frac{\varphi}{2}$$

tj. da se od interferirajućih talasa razlikuje po amplitudi i fazi. Dobijeni rezultat nam nameće dva ekstremna slučaja.

- 1) Ako su polazni talasi u fazi, tj kada je $\varphi = 0$, $y = 2y_0 \sin(\omega t - kx)$, rezultujući talas je dvostruko veće amplitude, što predstavlja slučaj pozitivne ili konstruktivne interferencije.

- 2) Ukoliko su polazni talasi u suprotnoj fazi tj, $= \pi$, amplituda oscilovanja je $\mathcal{A} = 0$, što predstavlja destruktivnu interferenciju.

2.7 Odbijanje talasa

Odbijanje nastaje kada talas naiđe na prepreku ili na granicu dve sredine u kojima ima različite brzine prostiranja. U ovom drugom slučaju nastaje istovremeno i prelamanje talasa.

Kada talas naiđe na prepreku, u toj tački deformacija sredine (a samim tim i impuls koji nosi talas) menja smer. To znači da je došlo do promene faze talasa. Radi jednostavnosti pretpostavimo da se talas prostire duž pozitivne ose x . njegova jednačina glasi:

$$y_1 = y_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_1)$$

Odbijeni talas ima suprotan smer prostiranja i promenjenu fazu. Zato:

$$y_2 = y_0 \sin(\omega t + kx + \varphi_2)$$

U tački odbijanja dolazi do sabiranja „dolazećeg“ i „odlazećeg“ talasa.

$$y = y_1 + y_2 = y_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_1) + y_0 \sin(\omega t + kx + \varphi_2)$$

Na osnovu trigonometrijskog obrasca $\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$

Dobijamo rešenje

$$y = 2 \cos\left(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}\right)$$

U kojem je amplituda oscilovanja

$$\mathcal{A} = 2 \cos\left(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)$$

Na mestu refleksije (odbijanja) od prepreke, amplituda rezultujućeg talasa jednaka je nuli, pa stavljajući $x=0$,

$$\cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = 0, \quad \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = \frac{\pi}{2}, \quad \text{tj } \varphi_2 = \varphi_1 + \pi.$$

Znači da odbijeni talas ima skok faze za π radijana. Ova pojava se dešava uvek kada se talas odbija od sredine u kojoj bi imao manju brzinu prostiranja.

Ukoliko bi talas naišao na granicu sa sredinom u kojoj bi imao veću brzinu prostiranja došlo bi do povećanja amplitude: $x=0$,

$$\cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = 1, \quad \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = 0, \quad \varphi_2 = \varphi_1$$

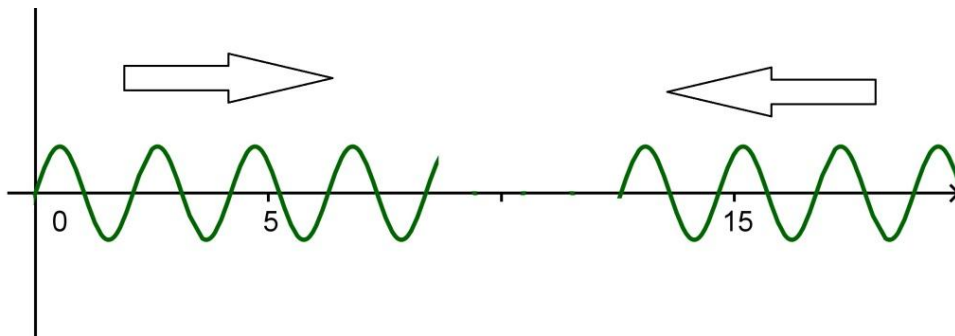
Ova analiza i zaključci bi važili kako za transverzalne tako i za longitudinalne talase.

2.8 Stojeći talasi (uopšte)

Ponekad se dešava da se talasi ne prostiru već da se vibracije odvijaju stalno na istim mestima. Takvi talasi se na primer mogu videti na površini vode u čaši kada je stavimo na već mašinu ili uređaj koji ima uključeni motor. Stojeći talasi nastaju superpozicijom dva (može i više) progresivna talasa jednakih amplituda, istih frekvencija ali suprotnog smera kretanja. Ako pođemo od jednačine:

$$y = y_0 \sin\left(\omega t - \omega \frac{\Delta x}{c}\right),$$

možemo napisati jednačine dva talasa koji se kreću u suprotnim smerovima:



Slika 2.9

$$y_1 = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

i

$$y_2 = y_0 \sin(\omega t + kx)$$

Talas y_1 se prostire u pozitivnom smeru x- ose, dok y_2 u suprotnom (negativnom smeru). Njihovim sabiranjem (interferencijom) nastaje stojeći talas:

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx) + y_0 \sin(\omega t + kx)$$

Razvijanjem zagrada, dobijamo:

$$y = y_0 \sin\omega t \cos kx - y_0 \cos\omega t \sin kx + y_0 \sin\omega t \cos kx + y_0 \cos\omega t \sin kx$$

Konačna jednačina stojećeg talasa je :

$$y = 2y_0 \sin\omega t \cos kx.$$

U njoj je razdvojena vremenska zavisnost oscilovanja od prostorne. Zato se pod amplitudom podrazumeva član:

$$A(x) = 2y_0 \cos kx.$$

Pošto je faza onaj argument trigonometrijske funkcije koji zavisi od vremena, vidimo da je u ovom slučaju to ωt , što, dakle, znači da kod stojećeg talasa faza ne zavisi od položaja čestice sredine zahvaćene talasnim procesom kao što je to bio slučaj kod progresivnih talasa. To znači da svi delići sredine istovremeno prolaze kroz amplitudne položaje, ravnotežne položaje itd. Slično, zaključujemo da postoji još jedna bitna razlika između stojećih i progresivnih talasa. Naime, kod stojećih talasa amplituda je $2y_0 \cos kx$, što znači da zavisi od

položaja čestice i da različiti delići sredine zahvaćeni talasom (različito x) osciluju različitom amplitudom.

Vrednosti amplitude se kreću u granicama

$$A(x) = 0, \quad i \quad A(x) = \pm 2y_0.$$

Amplituda može uzimati vrednost od 0 (čvor stojećeg talasa), $A(x) = 0$ ako $\cos kx=0$

$$\frac{2\pi}{\lambda}x = \frac{2n+1}{2}\pi \quad x_1 = \frac{1}{4}\lambda \quad x_2 = \frac{3}{4}\lambda \quad x_3 = \frac{5}{4}\lambda \quad \dots\dots\dots(a)$$

(trbuh stojećeg talasa), $A(x) = \pm 2y_0$ ako $\cos kx = \pm 1$

$$\frac{2\pi}{\lambda}x = n\pi \quad x_1 = 0, \quad x_2 = \frac{\lambda}{2}, \quad x_3 = \frac{2}{2}\lambda, \quad x_4 = \frac{3}{2}\lambda, \quad \dots\dots\dots(b)$$

Zbog ovih uslova, nije moguće da se stvore stojeći talasi bilo kojih frekvencija već tačno određenih, tzv. sopstvenih ili rezonantnih frekvencija. Koliko iznose tačno rezonantne frekvence zavisi od vrste ograničene sredine i mi ćemo kao primer navesti neke od njih.

3. ZVUK

3.1 Uvod

Još je starogrčki filozof Aristotel smatrao da se zvuk i svetlost prostiru kroz vazduh slično talasima na morskoj površini. Takođe je mislio, da ni svetlost ni zvuk ne mogu da se prostiru bez supstancijalne sredine tj. vazduha. Trebalo je da prođe dosta vekova da bi se ova Aristotelova pretpostavka i potvrdila. Naime, tek u XVII veku je pošlo eksperimentatorima pošlo za rukom da “proizvedu” vakum. Ispod staklenog zvona je bio postavljen mehanički sat, čije kucanje je prestalo da se čuje nakon izvlačenja vazduha. Što se tiče zvuka, Aristotel je bio u pravu.

Živimo u svetu punom zvuka. Naše okruženje je prepuno buke kojoj smo izloženi čak i pre samog rođenja, zbog čega je prirodno razvijeno čulo sluha kojim opažamo zvuke iz životne sredine. Neki zvuci nastaju prirodno, kao što je grmljavina, šum vetra. Neki zvuci nastaju sa određenim razlogom: cvrkut ptica, zov životinja, ljudski glas, a neki zvuci su samo buka (saobraćaj, zvuk mašina u fabrikama) koja nas opterećuje i zagađuje prirodnu sredinu.

Šta je to konkretno zvuk i kako ga je moguće okarakterisati i proizvesti? Uzrok svakog zvuka su vibracije, brzi pokreti, oscilovanje čestica sredine koje prenose energiju. Zvučne vibracije možemo direktno da osetimo. Dovoljno je da rukom dodirnemo zvučnik ili naprimer bubanj pa da osetimo vibracije elastične površine. Izvor zvuka (naprimer elastična membrana bubnja) naizmenično sabija i razređuje molekule vazduha. Dakle, molekuli elastične sredine osciluju oko svog ravnotežnog položaja prenoseći jedni drugima energiju, a mesta razređivanja i sabijanja se pravilno menjaju i pomeraju. Pri određenim uslovima mogu i da stoje. Na mestima gde je došlo do sabijanja čestica pritisak vazduha se malo povećava u odnosu na mesta razređivanja. Ova promena pritiska nije velika (kod običnog govora iznosi oko 0,01Pa,) ali je dovoljna da izazove nervni nadražaj u uhu i proizvede subjektivni opažaj zvuka.

U fizičkom smislu, zvuk je jednostavno mehaničko pobuđivanje materijalne sredine koja može biti u bilo kom agregatnom stanju, odnosno vazduh – ili bilo koji drugi gas, čvrsto telo ili tečnost. Ipak ovako jednostavan opis nije mnogo od koristi pošto ne daje informacije o načinu pobuđivanja ili o njegovom prostiranju niti o bilo kakvim neophodnim karakteristikama sredine kroz koju se pobuđeno mesto prostire. Stoga je potrebno jasnije i preciznije opisati na osnovu kojih osobina može biti predviđeno ponašanje zvuka u različitim kontekstima.

3.2 Karakteristike zvuka

Postoje tri osnovne karakteristike zvuka : jačina, visina i boja. Najvažnija karakteristika zvučnih talasa je intenzitet zvuka. Jačinu zvuka možemo da odredimo objektivno kao protok energije kroz površinu S za vreme Δt :

$$I = \frac{\Delta E}{S * \Delta t}$$

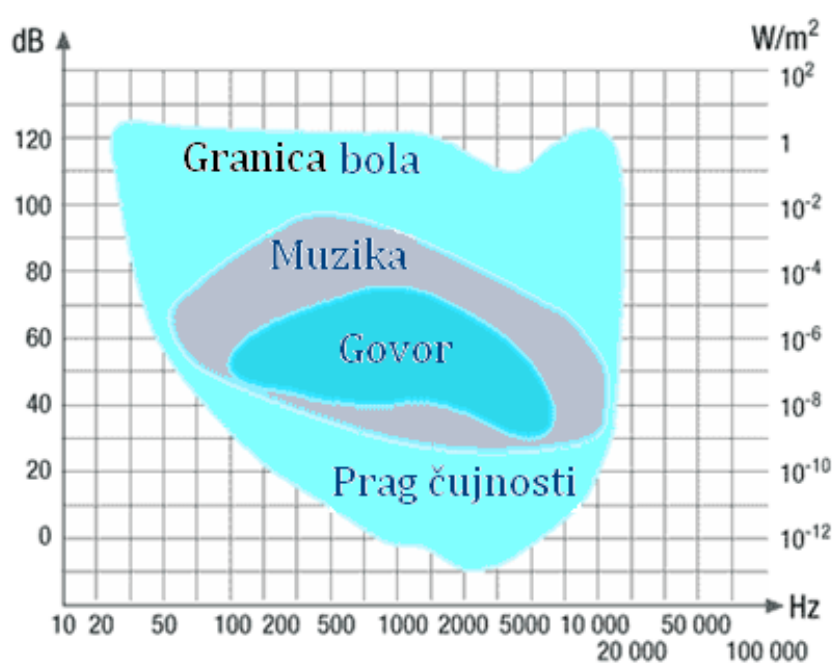
Jedinica objektivne jačine je $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Jačinu zvuka opažamo čulom sluha, fiziološki mehanizam je složen i treba istaći da dva puta veći intenzitet zvuka ne opažamo dva puta jače, zato je uvedena subjektivna jačina zvuka na

osnovu Veber-Fehnerovog psihofizičkog zakona po kome je subjektivna jačina zvuka L proporcionalna logaritmu njegove jačine I i jačine istog zvuka na pragu čujnosti I_0 :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

u kojoj je $I_0 = 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ Jedinica subjektivne jačine zvuka je decibel (dB)



Slika 3.1

Da bi zvučni talas izazvao osećaj zvuka, potrebno je da jačina zvuka prelazi neku minimalnu vrednost koju nazivamo **prag čujnosti**. Zvuk čija jačina leži ispod ove vrednosti uho ne registruje. Prag čujnosti je različit za različite frekvencije. Čovečije uho je najosetljivije na frekvencije u oblasti 1000 – 3000 Hz. Oscilacije vrlo velike jačine ne čuju se više kao zvuk, već izazivaju osećaj pritiska koji dalje prelazi u osećaj bola. Maksimalna vrednost jačine zvuka kod koje dolazi do pomenutog osećaja naziva se granica bola.

Zbog različite osetljivosti uha na različite frekvencije, prikazuje se tzv. oblast čujnosti koja je ograničena najnižom frekvencijom, koju može ljudsko uho da čuje a koja iznosi oko 20Hz, najvišom frekvencijom – 20000Hz, najmanjom jačinom zvuka **prag čujnosti** i najvećom jačinom zvuka koju nazivamo – **granica bola**. Mehaničko treperenje postoji i izvan ovih oblasti. Tako oblast zvuka ispod vrednosti 20Hz nazivamo **infrazvuk** a iznad 20000Hz – **ultrazvuk**.

3.2.1 Podela zvuka

Zvuk može da nastane nepravilnim ili pravilnim treperenjem zvučnog izvora. U prvu grupu ubrajamo buku, škripanje, lupanje i šum. Pravilan zvuk ili drugačije, ton, ima četiri

glavne karakteristike: jačinu, visinu, boju i trajanje. O ovim karakteristikama će biti detaljnije napisano nešto kasnije

3.2.2 Karakteristike tonova (jačina visina boja)

Jačina tona je srazmerna kvadratu amplitude oscilovanja.

Visina tona je određena frekvencijom oscilovanja.

Pošto izvori tonova (muzički instrumenti, ljudski glas) proizvode složeno oscilovanje, boja tona je određena sastavom viših harmonijskih frekvencija (harmonika). Prema boji tona (ili zvuka) prepoznamo izvore koji ih proizvode.

3.2.3 Izvori zvuka

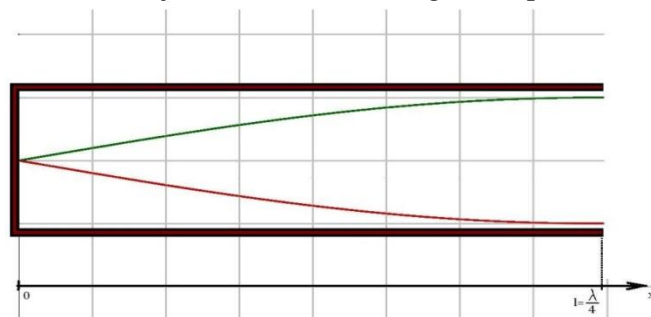
Izvor zvuka može da bude svako telo koje treperi frekvencijom iz oblasti čujnosti ljudskog uha. Svaki izvor zvuka stvara energiju na račun nekog drugog oblika energije koju dobija iz oblasti izvan zvučnog polja. U izvoru se odvija proces pretvaranja tog drugog oblika energije u mehaničku energiju oscilovanja sredine koja okružuje izvor. U praksi se ipak koriste samo takvi izvori koji zadovoljavaju određene uslove. To su najčešće zategnute žice, elastične šipke, štapovi, ploče, membrane, vazdušni stubovi.

Osnovna karakteristika zvučnog izvora je sopstvena frekvencija i snaga koju može da emituje u okolni prostor. Da bi se povećala snaga zvučnog izvora koristi se efekt rezonancije. Zvučni izvor mora da poseduje i sposobnost reprodukcije, tj. da i posle dužeg vremena emituje zvuk sa istim karakteristikama.

3.3 Treperenje vazdušnih stubova (nastaju stojeći talasi)

3.3.1 Stojeći talasi u cevi otvorenoj sa jednog kraja

I u ovom slučaju potrebno je da se dva progresivna talasa iste frekvencije i amplitude kreću u suprotnim smerovima ali će talas prilikom odbijanja od dna cevi promeniti fazu oscilovanja za π radijana. Tada će jednačine tih talasa izgledati, prema slici 3.2, ovako:



Slika 3.2

$$y_1 = y_0 \sin(\omega t - kx + \pi)$$

Ovo je jednačina talasa koji se odbio od dna i kreće se u negativnom smeru x-ose, prema dnu cevi, a

$$y_2 = y_0 \sin(\omega t + kx)$$

jednačina talasa koji se kreće u pozitivnom smeru x-ose. Interferencijom (slaganjem) ova dva talasa nastaje stojeći talas. Pošto je $\sin(\omega t + \pi) = -\sin \omega t$, jednačina za y_1 postaje:

$$y_1 = -y_0 \sin(\omega t - kx)$$

Tada:

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = y_0 \sin(\omega t + kx) - y_0 \sin(\omega t - kx)$$

Odavde se lako dobija rešenje:

$$y = 2y_0 \sin kx \cos \omega t$$

Amplituda stojećeg talasa je na osnovu ove jednačine $A(x) = 2y_0 \sin kx$.

Uslovi čvorova i trbuha stojećih talasa su dati:

$$A(x) = 0 \quad \text{ako} \quad \frac{2\pi}{\lambda} = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

tada je $x_1 = 0$; $x_2 = \frac{\lambda}{2}$; $x_3 = \frac{2}{2}\lambda$; $x_4 = \frac{3}{2}\lambda$; ...

$$A(x) = \pm 2y_0 \quad \text{ako} \quad \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2n+1}{2}\pi \quad \text{tj.} \quad x_1 = \frac{1}{4}\lambda \quad x_2 = \frac{3}{4}\lambda \quad x_3 = \frac{5}{4}\lambda \quad \dots$$

Najkraća dužina cevi potrebna da se prema gore navedenim uslovima obrazuje stojeći talas iznosi $l = \frac{\lambda}{4}$. Frekvencija talasa na ovoj dužini cevi obrazuje osnovni ton.

Dvostruko veća frekvencija $\omega_2 = 2\omega$ daje sledeće uslove:

$$A(x) = 0 \quad \text{za} \quad x_2 = \frac{\lambda}{4}; x_3 = \frac{2}{4}\lambda; x_4 = \frac{3}{4}\lambda; \dots$$

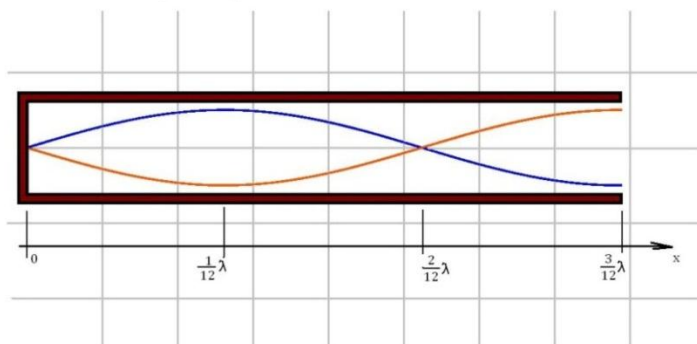
$$A(x) = \pm 2y_0 \quad \text{za} \quad x_1 = \frac{1}{8}\lambda \quad x_2 = \frac{3}{8}\lambda \quad x_3 = \frac{5}{8}\lambda \quad \dots$$

Što znači da ova frekvencija ne može na dužini $l = \frac{\lambda}{4}$ da ostvari stojeći talas.

Trostruko veća frekvencija $\omega_3 = 3\omega$ daje sledeće uslove:

$$\text{Za čvorove:} \quad x_1 = 0 \quad x_2 = \frac{\lambda}{6} \quad x_3 = \frac{\lambda}{3} \quad \dots$$

$$\text{Za trbuhe:} \quad x_1 = \frac{1}{12}\lambda \quad x_2 = \frac{3}{12}\lambda \quad x_3 = \frac{5}{12}\lambda \quad \dots$$

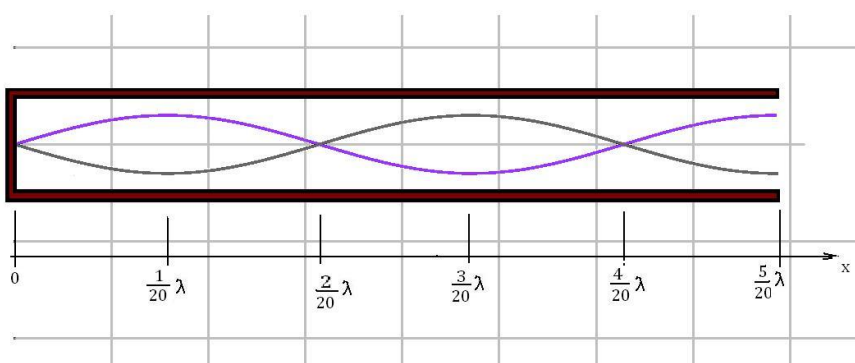


Slika 3.3 za harmoničnu fekvenciju ω_3

Četvorostruka frekvencija ne uspostavlja stojeći talas ali petostruka da: $\omega_5 = 5\omega$,

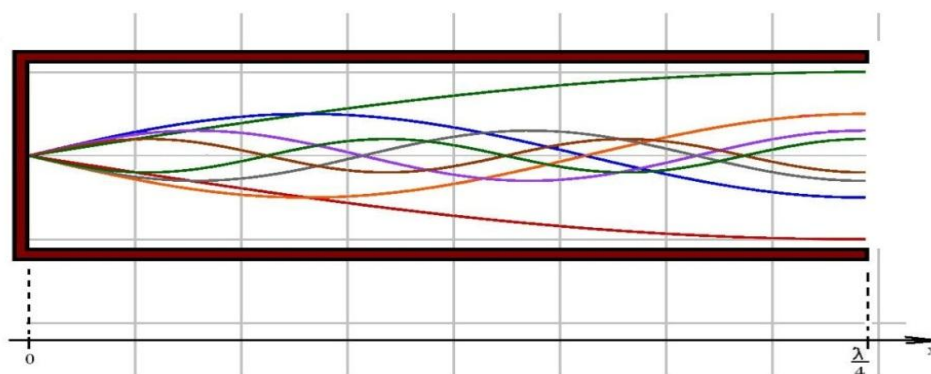
$$A(x) = 0 \text{ za } x_1 = 0 \quad x_2 = \frac{2\lambda}{20}; \quad x_3 = \frac{4}{20}\lambda; \quad \dots$$

$$A(x) = \pm 2y_0 \text{ za } x_1 = \frac{1}{20}\lambda \quad x_2 = \frac{3}{20}\lambda \quad x_3 = \frac{5}{20}\lambda$$



Slika 3.4 za ω_5 harmoničnu frekvenciju

Ukupno oscilovanje vazduha u cevi zatvorenoj sa jednog kraja predstavlja zbir talasa svih frekvencija koje ispunjavaju uslov stojećih talasa. I u ovom slučaju osnovni ton ima najveću amplitudu dok ostale više frekvencije samo određuju boju tona. Kao ilustraciju navodimo sledeću sliku :



Slika 3.5

3.3.2 Stojeći talasi u cevi otvorenoj sa oba kraja

Neka je cev otvorenog vazdušnog stuba postavljena u pozitivnom smeru x -ose. Da bi se u njoj ostvario stojeći talas, potrebno je da se duž njenog pravca u suprotnim smerovima kreću progresivni talasi čije su jednačine :

$$y_1 = y_0 \cos(\omega t - kx) \quad \text{i} \quad y_2 = y_0 \cos(\omega t + kx)$$

Njihovim sabiranjem (interferencijom) dobijamo:

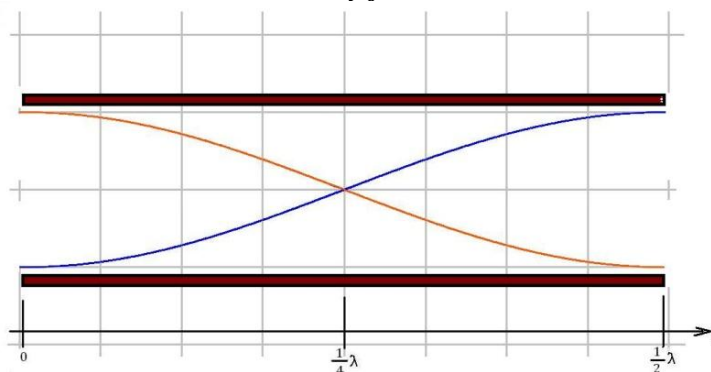
$$y = y_1 + y_2$$

$$y = y_0 \cos \omega t \cos kx + y_0 \sin \omega t \sin kx + y_0 \cos \omega t \cos kx - y_0 \sin \omega t \sin kx$$

$$y = 2y_0 \cos \omega t \cos kx$$

u kojoj je amplituda stojećeg talasa

$$A = 2y_0 \cos kx$$



Slika 3.6

Mesta čvorova stojećeg talasa dobijamo iz uslova $A(x) = 0$, tj. $\cos kx = 0$,

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = \frac{2n + 1}{2} \pi$$

$$x_1 = \frac{1}{4} \lambda \quad x_2 = \frac{3}{4} \lambda \quad x_3 = \frac{5}{4} \lambda$$

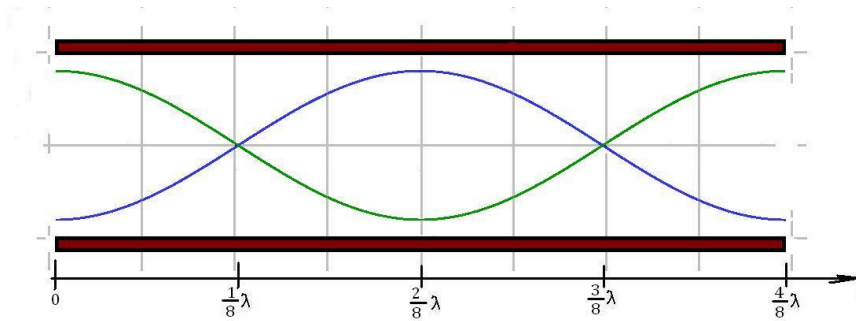
Trbuhe stojećih talasa dobijamo iz uslova $A(x) = \pm 2y_0$, tj.

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = n\pi$$

$$x_1 = 0, \quad x_2 = \frac{\lambda}{2}, \quad x_3 = \frac{2}{2} \lambda, \quad x_4 = \frac{3}{2} \lambda,$$

Odavde sledi da je najmanja dužina vazdušnog stuba za obrazovanje stojećeg talasa talasne dužine λ , $l = \frac{\lambda}{2}$. Zato iz navedenog skupa rešenja preostaju mesto jednog čvora $x_1 = \frac{1}{4} \lambda$, i dva trbuha $x_1 = 0$, $x_2 = \frac{\lambda}{2}$. Ostale vrednosti u relacijama se odbacuju jer se nalaze izvan cevi.

Vazduh na otvorima cevi osciluje suprotno, sa najvećom amplitudom, dok na polovini cevi miruje. Tamo je čvor stojećeg talasa. Kretanje vazduha u cevi bi bilo analogno oscilovanju dveju mehaničkih kuglica, međusobno povezanih elastičnom oprugom.



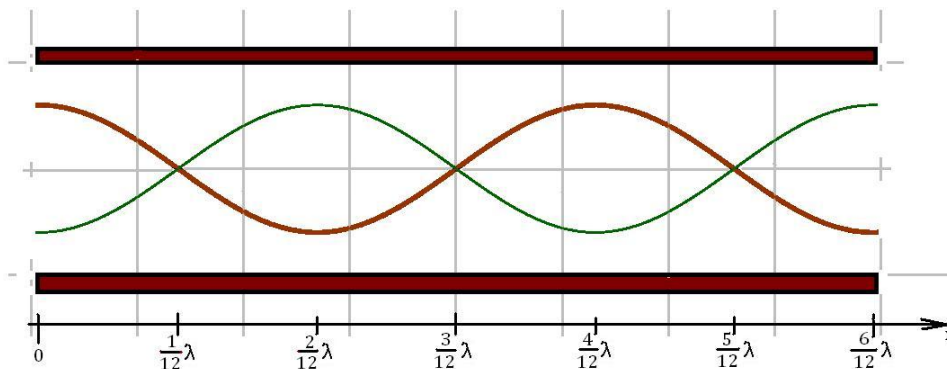
Slika 3.7 za dvostruku frekvenciju

Na ovoj istoj dužini otvorene cevi, $l = \frac{\lambda}{2}$, uslov stojećeg talasa može da ostvari i dvostruko veća frekvencija od osnovne: $\omega_2 = 2\omega$, tada je $v_2 = 2v$, odnosno talasna dužina $\lambda_2 = \frac{\lambda}{2}$. Tada, uslov čvorova stojećeg talasa, $A(x) = 0$

je ispunjen za $x_1 = \frac{1}{8}\lambda$ i $x_2 = \frac{3}{8}\lambda$.

Za položaje trbuha $A(x) = \pm 2y_0$

dobijamo: $x_1 = 0$, $x_2 = \frac{\lambda}{4}$, i $x_3 = \frac{2}{4}\lambda$,

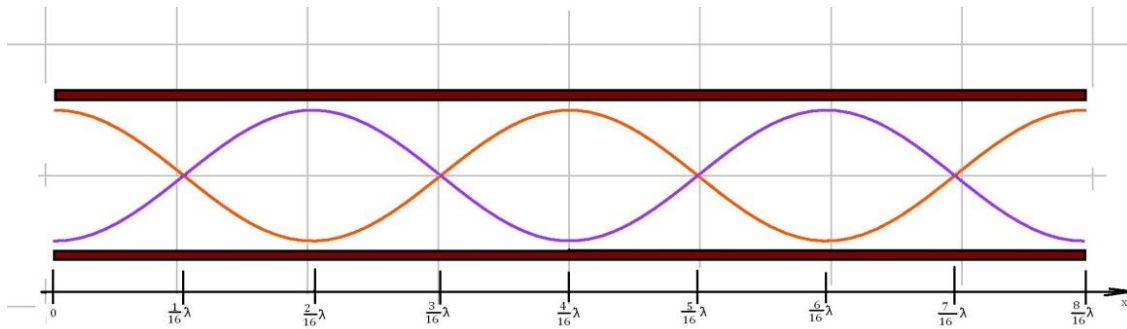


Slika 3.8 za trostruku frekvenciju

Sledeća viša frekvencija koja može obrazovati stojeći talas u pomenutoj cevi može biti $\omega_3 = 3\omega$. Talasna dužina je $\lambda_3 = \frac{\lambda}{3}$, pa uslovi stojćeg talasa daju mesta čvorova

$$x_1 = \frac{1}{12}\lambda, \quad x_2 = \frac{3}{12}\lambda \quad \text{i} \quad x_3 = \frac{5}{12}\lambda$$

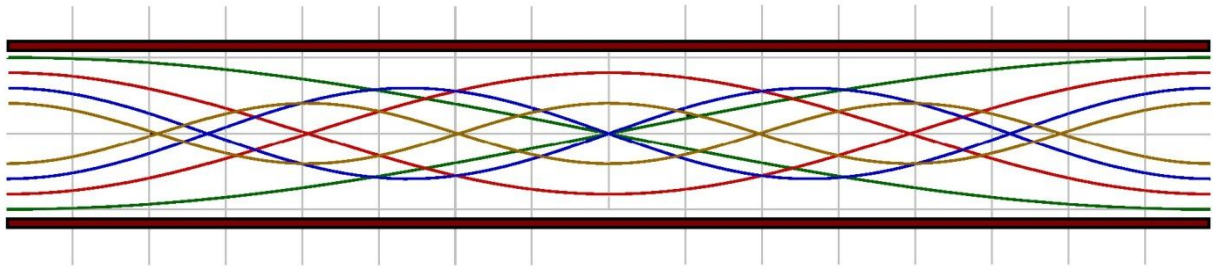
I trbuha : $x_1 = 0$ $x_2 = \frac{2\lambda}{12}$ $x_3 = \frac{4\lambda}{12}$ i $x_4 = \frac{6\lambda}{12}$



Slika 3.9 stojeći talasi za 4-struku frekvenciju

I tako, svaka frekvencija koja je celobrojni umnožak osnovne frekvencije ω daje u cevi dužine $l = \frac{\lambda}{2}$ stojeće talase. Najmanja frekvencija (najveća talasna dužina) proizvodi tzv. osnovni ton najveće amplitude, dok ostale frekvencije malih amplitude određuju boju tona. Njihove amplitude zavise od raznih faktora a navešćemo neke: od vrste materijala cevi, pritiska, vlažnosti i sastava vazduha.

Ukupno oscilovanje vazduha u cevi otvorenoj sa oba kraja predstavlja zbir talasa svih frekvencija koje ispunjavaju uslov stojećih talasa. Kao ilustraciju navodimo sledeću sliku :



Slika 3.10

4. SLOVAČKI NACIONALNI DUVAČKI INSTRUMENT – FUJARA

4.1 Karakteristike fujare kao muzičkog instrumenta

Fujara je najspecifičniji slovački duvački narodni instrument upravo zbog svoje veličine, pomoćnog vazdušnog kanala i činjenice da ima samo tri bočne rupe. Nigde u svetu se ne nalazi instrument sličnih karakteristika, i zato se može reći da je fujara raritet i dragocenost slovačkog folklora. Dana 25. novembra 2005. godine fujara je uvedena na UNESCO-vu listu usmenog i nematerijalnog kulturnog nasleđa (Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity).

Možemo sa sigurnošću reći da je fujara kao poseban muzički instrument nastala među pastirskim stanovništvom centralne Slovačke koja je i danas poznata pod nazivom Podpoljanje (Podpolanie). Njeno jedinstveno i usko lokalizovano prostiranje potvrđuje da nije donesena Valaskom kolonizacijom (sa prostora Velikomoravske kraljevine – današnja istočna Češka), već je njeno poreklo nešto novijeg datuma, o čemu svedoče i prvi pisani tragovi sa polovine 18. veka. Nekoliko elemenata ukazuje da se fujara nadovezuje na ostale pastirske frule. Tehnologija izrade kao bušenje i spoljašnja obrada, izrada glasnice i tonskog uređenja, ornamentika pri ukrašavanju i zaštita samog drveta je veoma slična ostalim vrstama pastirskih instrumenata.

Fujara ima i specifične muzičko akustičke osobine. Mekana baritonska boja i veliki raspon tonova sa mogućnošću dinamičkog izražavanja od pianissima do mezoeforte, prirodni štiti sa karakterističnim nedostacima oštrih i osetljivih tonova. Pri interpretaciji se koristi nekoliko tehnika od kojih su najbitnije: raspirivanje („rozfuk“), produvavanje („prefuk“) i sviranje na bočnim otvorima – rupama. Sve ovo je zaslužno za veličanstven ton koji proizvodi fujara.

Fujara kao muzički instrument je prvenstveno solistički instrument kojim su u prošlosti pastiri u samotnjačkom životu tokom ispaše izražavali svoje raspoloženje i emocije. Tako je i većina pesama nastala iz socijalne, pastirske, razbojničke, baladičke i ljubavne tematike, pa su osim muzičko instrumentalne izvedbe ove pesme imale i pripovedački karakter. U pojedinim situacijama su pastiri sa udaljenih pašnjaka koristili fujaru i kao način komunikacije i upozoravanja. Tradicionalno je fujara isključivo muški instrument što je i u današnje vreme pravilo, uz pojedine izuzetke, i nije se svirao u svim prilikama, kao ni u malim zatvorenim prostorima koji „guše“ zvuk fujare. Nije moguće svirati u brzim ritmovima, stoga se na fujari ne svira za igranje, mada postoje izuzeci, i to karakteristična igra pastira – **odzemok**, koja se sa lakoćom svira u ritmu.

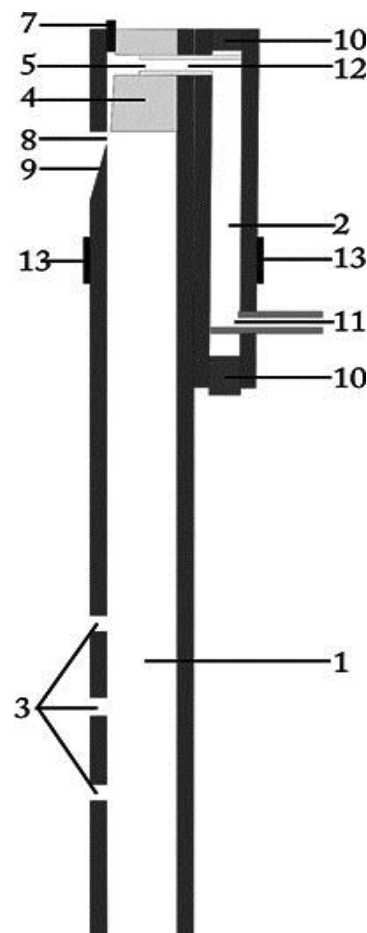
4.2 Konstrukcija FUJARE

Fujara se sastoji iz dva glavna dela – glavne cevi frule i pomoćnog vazdušnog kanala. Glavna cev je uzdužno probušena i otvorena sa donjeg kraja. U donjoj trećini instrumenta nalaze se karakteristična tri bočna otvora – rupe. Na gornjem kraju se nalazi glasnica koja obuhvata panjić sa kružnim bočnim otvorom, vazdušni kanal pravougaonog oblika koji je na vrhu zatvoren kožnim čepom i prozor glasnice saravnim klinom. Cev pomoćnog kanala je 2-3 puta tanja od glavne cevi, a sa oba kraja je zatvorena plutanim čepovima. Na donjem delu otprilike 2 do 3 cm od kraja, sa strane se nalazi nausnik, dok je pri vrhu ali sa suprotne strane

od nausnika spajajuća cevčica koja ulazi u bočni otvor u panjiću. Pomoćni vazdušni kanal je za glavnu cev fujare pričvršćen kožnim kajšem a u retkim slučajevima mesinganim prstenom. Kanalić je na gornjoj strani zatvoren kožnim čepom kako bi se postiglo da sav vazduh koji kroz cevčicu ulazi u njega bude usmeren prema klinu. Pomoćni vazdušni kanal služi kao most, zbog dimenzija samog instrumenta.

Na sledećoj slici šematski je prikazan uzdužni presek fujare i njenih glavnih delova:

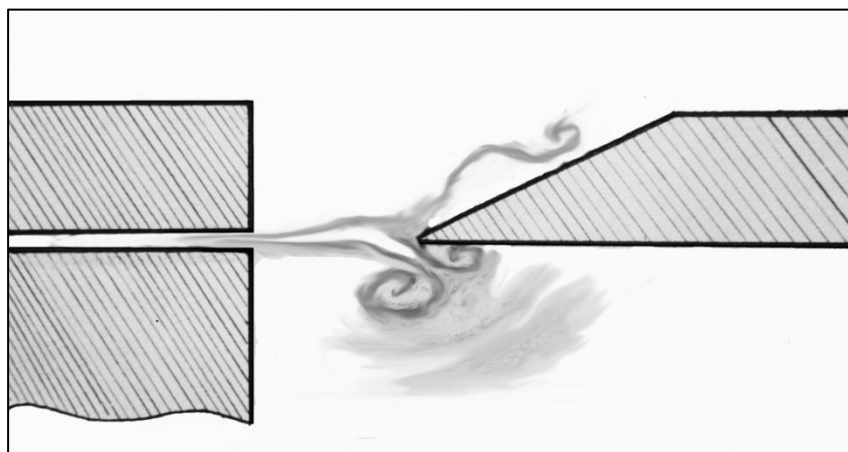
1. glavna cev frule
2. pomoćni vazdušni kanal
3. rupe - bočni otvori
4. panjić
5. kružni bočni otvor
6. pravougaoni kanalić
7. kožni čep
8. prozo glasnice
9. klin
10. plutani čepovi
11. nausnik
12. spajajuća cevčica
13. kožni kajš, ili mesingani prsten.



Slika 4.1

4.3 Formiranje zvuka u fujari

U fujaru se vazduh udvava preko nausnika, koji se nalazi na donjem delu pomoćnog kanala. Kroz njega vazduh samo struji do cevčice iz koje se usmerava kroz kanalić gde se povećava brzina proticanja vazduha. Ono što je bitno za nastajanje zvuka dešava se upravo na vrhu klina na koji se usmerena struja vazduha. Tu se vazduh cepa i počinje naizmenično da struji jednom unutar cevi fujare a zatim spoljašnjim zidom klina u okolni vazduh, čime vazduh u cevi zatreperi i nastaje zvuk. Kada vazduh struji u unutrašnjost cevi, uzrokuje na njenom početku lokalno povećanje pritiska. Ovo povećanje pritiska čini da se vazduh u njegovoj blizini pomeri, zbog čega deo vazduha počinje da kruži i vraća se prema prozoru. Ovo proizvodi efekat savijanja glavnog toka vazduha do te mere da se on prebaci na drugu



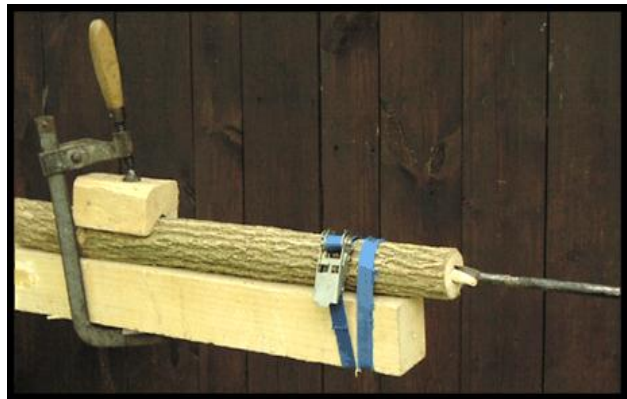
Slika 4.2

stranu klina prema okolnom prostoru. Proces se ponavlja, samo što ovaj put lokalno povećanje pritiska na spoljašnjem zidu klina u cevi ostavlja sniženi pritisak, sve dok se glavni tok ne prebaci sa spoljašnje strane ponovo u unutrašnjost cevi. Ciklus se ponavlja obezbeđujući cevi periodični izvor zvuka. Ovo znači da na početku cevi, kod klina, osciluje pritisak. Kada oblast povišenog pritiska dolazi na kraj cevi sabijeni vazduh odjednom ima mnogo prostora i ekspanira u okolni prostor čime na tom kraju nastaje podpritisak koji se sada kreće unazad duž cevi. Takođe u obrnutom slučaju ako na kraj cevi naiđe područje sniženog pritiska on će se unazad odbiti kao kompresija.

Ako oscilacije vazduha imaju odgovarajuću frekvenciju, moći će da zaosciluju vazdušni stub i nastaće stojeći talasi. Da bi došlo do rezonancije, frekvencija oscilovanja vazdušnog pritiska mora biti ista kao frekvencija stojećih talasa. Suština je u povratnoj sprezi, koja nastaje između strujanja vazduha i talasanja u cevi. Ove pojave su sinhronizovane tako da se međusobno nadopunjuju. Oblasti sniženog i povišenog pritiska prouzrokovani talasima u cevi naizmenično menjaju pravac strujanja vazduha unutra i napolje. Vazdušna struja će tako uvek u odgovarajućem trenutku dunuti unutar, čime će doprineti oscilovanju vazdušnog stuba unutar cevi, odnosno doći će do rezonancije.

4.4 Izrada instrumenta

Za izradu fujare, danas se koriste različite vrste drveta (zova, jasen, javor, orah, trešnja, ponekad i bagrem), dok je autentično, ali i danas najviše korišćeno drvo zove, upravo zbog mekane srži koja se proteže duž stabla. Zovu ne treba birati na mestima blizu vode i na „crnoj“ zemlji jer tamo raste brzo a gustina drveta ostaje mala. Izabrano drvo za instrument je potrebno odseći po mogućnosti u zimskom periodu kada drvo u sebi sadrži najmanje sokova. Na ovaj način se skraćuje vreme sušenja ali najbitnije je što se smanjuje verovatnoća da će drvo pri sušenju, početi da puca. Kako je neminovno da se na odsečenim krajevima usled sušenja pojave sitne pukotine, koje bi se vremenom proširile duž vlakana drveta, krajevi se zaštićuju vazelinom, jelenskom mašću ili lepkom za drvo. Odsečeno stablo ili granu pre sušenja prvi put bušimo sa oba kraja svrdlom ne većim od 15 mm, što je i približna debljina srži. Neki graditelji savetuju i mestimično guljenje kore.



Slika 4.3

Tokom procesa sušenja će se bušenje ponoviti još dva puta, svaki put sa većim prečnikom svrdla, kako bi na kraju prečnik cevi dostigao 30 mm (G-dur štim). Teorijski se približan prečnik cevi izračunava kao:

$$D_x = \frac{L}{55}$$

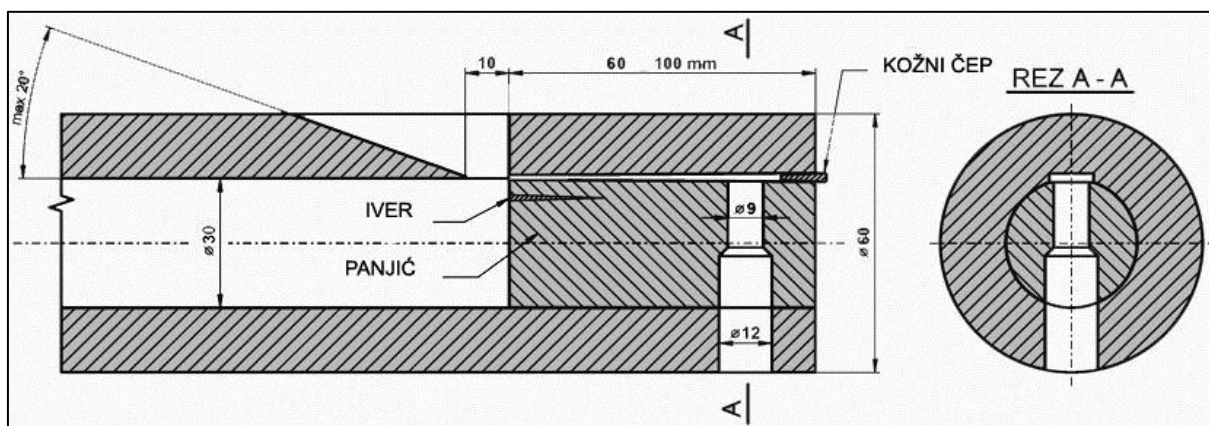
gde L predstavlja dužinu cevi. Stvarni prečnik bušenja će naravno zavistiti od veličine svrdla, pa će se zbog ove razlike uvoditi koeficijenti korekcije pojedinih veličina.

Nakon bušenja se prelazi na spoljašnju obradu. Najpre se grubo sa dvoručnim nožem i rendetom zidovi cevi stanjuju tako imaju pravilnu debljinu. Debljina zidova na gornjem kraju je oko 10 – 15 mm, dok je na donjem približno 6-8 mm. Zatim se površina još doradi

turpijom i citlingom, da bi na kraju finu površinu postigli brusnim papirima – šmirglama, različitih finoća, koja u ovoj fazi ne mora prelaziti P-220. Sada se još poravnaju krajevi normalno na osu cevi.

Kada je gotova glavna cev prelazimo na izradu glasice koja je i naj delikatniji deo instrumenta jer će od kvaliteta njene izrade zavisiti i kvalitet zvuka samog instrumenta. Najpre se pristupa izradi prozora glasnice. Izaberemo najpovoljniji pravac koji se proteže pravolinijski duž cele cevi i od gornjeg kraja se izmeri dužina:

$$H = 30 + k_h \quad , \quad k_h = 1.36D \quad ,$$



Slika 4.4

izraženo u *mm*, što je približno dvostrukom prečniku bušenja cevi. Na ovom mestu će se nalaziti centar prozora. U označenoj tački se najpre izbuši rupa prečnika 6 mm. Pre izrade samog prozora, u ovoj fazi je najbolje odmah dletom iskopati uzdužni kanalić koji za ovaj prečnik cevi bi trebalo da je 11 – 12 mm, a zatim se pomoću noža, dleta i finijih turpija formira prozor širine iste kao kanalić (12 mm) i visine 10 – 11 mm. Najzad se dlatom iste širine kao prozor izreže klin na donjoj ivici prozora. Ugao klina ne bi trebalo da bude veći od 20°. Sada je na redu panjić koji se pravi od drveta leske, koja se lako obrađuje i lako cepa. Panjić mora dobro da prijanja na zidove cevi, a duž kanala se malo poravna kako bi kanal imao pravougaoni oblik. Širina otvora kanala se može fino podesiti tako što se na panjiću napravi mali rascep na delu koji je na ivici prozora a u njega se ugurava tanak iver. Ovim se fino podešava da se vrh klina nalazi tačno po sredini pravougaonog kanala, kako bi jednake količine vazduha prolazile preko spoljašnje i unutrašnje strane klina. Sada je već moguće proizvesti zvuk osnovnog tona i pojedinih viših alikvotnih tonova, i podesiti akustični kvalitet samog instrumenta malim pomeranjem panjića.

Osnovni ton instrumenta zavisi od dužine glavne cevi, pa se željena intonacija, odnosno štim, dobija postepenim skraćivanjem cevi. Ovaj postupak se u novije vreme radi uz pomoć elektronskih štimera kako bi se posigla što preciznija osnovna frekvencija. Najčešći štim fujare je na G-dur sa osnovnom frekvencijom 98 Hz, čija dužina iznosi oko 1.72 m , mada postoje i A-dur sa osnovnom frekvencijom 110 Hz sa približnom dužinom 1.53 m i retko F-dur sa preko 1.92 m . Kolika treba da bude dužina cevi može se izračunati poznavanjem željene frekvencije osnovnog tona:

$$L = \frac{c}{2f} - k_x$$

gde je

$$k_x = k_k + k_h \quad , \quad k_k = 0.3 D$$

a c je brzina zvuka u vazduhu ali uzeta kao konstantna veličina, 333 m/s, a ne zavisno promenljiva od temperature i sadržaja vodene pare, dok je k_k ranije navedeno. Prema tome ukupna dužina instrumenta će biti:

$$L_c = L + H$$

U praksi, pri izradi kada je konačno određen osnovni ton, prelazi se na razmeravanje pozicija bočnih otvora. Poznata su četiri načina proračunavanja koji su dobijeni empirijskim putem, a najrasprostranjeniji je sledeći:

Dužini cevi, mereno od vrha klina, dodamo proračunski koeficijent korekcije $k_h = 1.36D$, a zatim podelimo na 14 delova, čime dobijamo parametar položaja bočnih rupa.

$$l = \frac{L + k_h}{14}$$

Pa su bočni otvori pozicionirani na sledećim mestima od donjeg kraja i međusobno :

$$l_1 = 2l + D \qquad l_2 = l + \frac{D}{3} \qquad l_3 = l - \frac{D}{3}$$

odakle se vidi da je srednja rupa pomerena za 10 mm na gore. Pojedini graditelji srednju rupu pomeraju za vrednost polovine prečnika bočne rupe, što bi kod rupe od 12 mm iznosilo 6 mm. Preporučeni prečnik bočnih rupa se takođe može izraziti pomoću prečnika bušenja cevi kao:

$$\emptyset = \frac{D}{3} + 2$$

Veličine koje figurišu u izrazima su sledeće:

- $f(\nu)$ – frekvencija osnovnog tona
- c – brzina zvuka
- D_x – teorijska vrednost unutrašnjeg prečnika cevi
- D – stvarni prečnik bušenja cevi
- L_c – cela dužina fujare
- L – dužina od vrha klina do donjeg kraja
- l – osnovni parametar za određivanje položaja bočnih rupa
- l_1 – udaljenost prve rupe od donjeg kraja
- l_2 – razmak između prve i druge rupe
- l_3 – razmak između druge i treće rupe
- H – dužina panja
- k_k, k_h, k_x – proračunski koeficijenti
- \emptyset – prečnik bočnih rupa

Prema navedenim podacima moguće je izračunati osnovne parametre za izradu ovog instrumenta za bilo koji štim. Kako su instrumenti koji se najčešće koriste G, A i ređe F-dur, za ova tri štima su u tablici prikazani izračunati parametri:

<i>Tablica vrednosti parametaraza izradu fujare</i>														
<i>Štim</i>	<i>f(Hz)</i>	<i>D_x</i>	<i>D</i>	<i>L_c</i>	<i>L</i>	<i>l</i>	<i>l₁</i>	<i>l₂</i>	<i>l₃</i>	<i>Ø</i>	<i>k_x</i>	<i>k_k</i>	<i>k_h</i>	<i>H</i>
F	87,3	33,6	35	1926	1849,1	135,5	305,9	147,2	123,8	13,7	58,10	10,5	47,6	77,6
G	98,0	29,9	30	1720	1649,2	120,7	271,4	130,7	110,7	12,0	49,8	9,0	40,8	70,8
A	110	26,7	28	1535	1467,1	107,5	243,0	116,8	98,2	11,3	46,5	8,4	38,1	68,1

Svi parametri su izraženi u milimetrima osim frekvencije koja je u hercima

Bočne rupe ne treba odmah bušiti na predložen prečnik. U praksi se ovo vrši postepeno tako da se najpre buše burgijom 8-9 mm, a zatim se tankom okruglom turpijom doraduju dok se ne postigne željeni ton. Sada je instrument spreman za sviranje. Međutim, drveni instrument ne bi mogao dugo da traje bez odgovarajuće zaštite.

4.5 Ukrašavanje i zaštita instrumenta

Kada smo zadovoljni zvukom i štimanjem instrumenta potrebno ga je zaštititi kako bi odolevao spoljašnjim uticajima kao što su vlaga, suv vazduh, prašina... Često se instrument pre završnog lakiranja ukrašava na različite načine. Kao tehnike ukrašavanja izdvajaju se bajcovanje, natapanje kiselinom (ili bajcom ali samo pojedina mesta), pirografija i duborez. Ponekad se koriste u više tehnika na istom instrumentu.



Slika 4.5

Najjednostavniji način je da se ceo instrument tonira različitim pigmentnim rastvorima – bajcuje. Ovakav način se koristi kod drveta koje već na sebi ima izražene šare od godova i čornih mesta.

Ipak najzastupljeniji su instrumenti koji su ukrašeni različitim folklornim motivima sličnim onima koji su vezeni na narodnim nošnjama, a predstavljaju stilizovane cvetove ili simetrične geometrijske figure. Ornamentika se obično najpre skicira na paus papir sa kojeg se zatim lako preslika na instrument. Ove konture se zatim zarezū nožem kako bi ostali plitki i uzani kanalići. Njihova uloga je da spreče razlivanje sredsava za bojenje izvan motiva. Tehnika natapanja koristi azotnu kiselinu (HNO₃), a ređe sumpornu.



Slika 4.6

Azotna kiselina na drvetu ostavlja karakterističnu bakarnu boju ali samo ako se nanošenje vrši pri temperaturama većim od 20° C, jer u suprotnom na nižim temperaturama neravnomerno pozeleni. Po završetku rada sa kiselinom potrebno je ostaviti da boja „sazri“ 3-4 dana, nakon čega se još površina prebrusi šmirglama finoće P1000-1500, čime se uklanjaju fine dlačice nastale natapanjem kiselinom.

Tehnika pirografije se svodi na jednostavno paljenje kontura motiva kako bi se istakli na samoj površini.

Duborez, iako pruža velike mogućnosti pri ukrašavanju, ipak nije čest izbor među graditeljima. Ova tehnika zahteva veću debljinu zidova cevi fujare, što kao rezultat daje zamućeniji i mumlaviji zvuk. Naravno, i masa instrumenata će zbog toga biti znatno veća.

Kao zaštitni lak graditelji muzičkih instrumenata najčešće koriste prirodne smole rastopljive u denaturisanom alkoholu – špiritusu. Jedan od ovih zaštitnih lakova je i šelak, a tehnika njegovog nanošenja je poznata i pod nazivom „Francusko poliranje“. Šelakom se postiže visoki sjaj lakirane površine a eventualna oštećenja se vrlo lako saniraju. Iako se šelak brzo suši, poželjno je između nanošenja sledećih slojeva sačekati da prethodni sloj potpuno očvrstne, za šta je potrebno od 36 do 48 sati.

Unutrašnjost cevi se premazuje lanenim ili bademovim uljem. Pri kasnijem održavanju instrumenta se koristi nešto suvlje parafinsko ulje. Nakon premazivanja potrebno je da se instrument ostavi i do nedelju dana kako bi se ulje dobro upilo u drvo a zatim još prebrisati unutrašnjost krpicom na štapu kako bi se odstranio eventualni višak ne upijenog ulja.

Sada, kad su delovi instrumenta konačno završeni i zaštićeni, ostaje samo da se sklope i povežu glavna i pomoćna cev kožnim kajšem, a instrument je konačno spreman za upotrebu.

4.6 Osnove tehnike sviranja

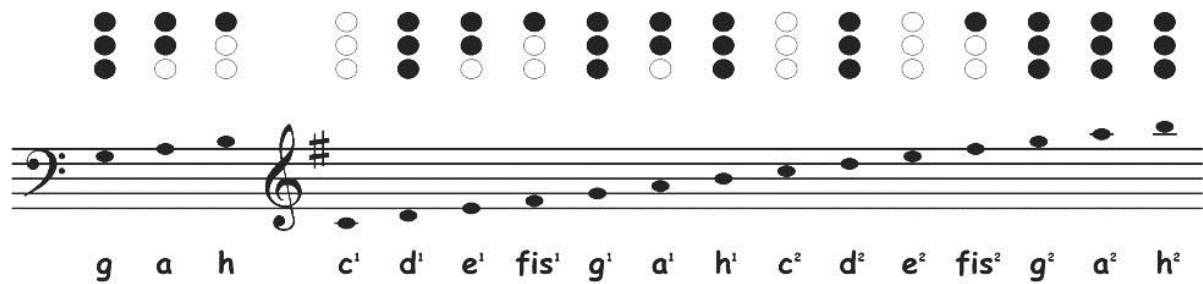
Zbog svojih dimenzija, fujara ima specifično držanje a svira se isključivo u sojećem položaju uz mali raskorak i blago nagnuti unapred. Instrument se najčešće drži levom rukom iznad gornje rupe, tako da se srednjim ili domalim prstom gornja rupa može zatvoriti. Desnom rukom se instrument ne drži već se palcem i domalim prstom zatvaraju srednja i donja rupa respektivno. Neki instrumentalni izvođači srednju rupu umesto palcem zatvaraju mišićem palca u korenu dlana. Instrument se ne drži vertikalno već, kako prirodno naslonimo o desnu nogu a nausnik da je u visini usta, instrument će biti malo ukošen.

Već je ranije pomenuto da postoje tri osnovne tehnike koje se kombinuju u toku sviranja i to: raspirivanje („rozfuk“), produvanje („prefuk“) i sviranje na bočnim otvorima. Prve dve se koriste kao ukrasi a melodija se svira otvaranjem pojedinih rupa, ali i različitim jačinama duvanja kako bi se postigli viši alikvotni tonovi. Posebno se još na gornjoj ili srednjoj rupi, u zavisnosti od samog instrumenta, pri držanju dužih intervala jedne note, brzim otvaranjem i zatvaranjem rupe proizvodi vibrato. Pošto instrument ima samo tri rupe, a viši tonovi se dobijaju kontrolisanim disanjem, odnosno različitim jačinama uduvanja



Slika 4.7

vazduha, nije moguće odsvirati sve tonove hromatske lestvice. Koji se tonovi mogu odsvirati na fujari prikazano je na sledećoj slici:



Slika 4.8

Iznad odgovarajućih nota lestvice, prikazan je i raspored otvaranja odgovarajućih rupa. Crne tačke predstavljaju zatvorene a bele otvorene rupe. Svaka pozicija koja odgovara ztvorenim svim rupama ima različite jačine duvanja dok se tonovi do sledeće pozicije održavaju u istoj jačini sa otvaranjem odgovarajućih rupa. Iz priložene slike zaključujemo da iako ne postoje svi stepeni i polustepeni lestvice, fujara ipak poseduje prilično velik raspon tonova.

Prema priloženoj slici vidimo da jedna ista kombinacija otvorenih odnosno zatvorenih bočnih otvora na fujari proizvodi odgovarajuću seriju tonova. Uočavamo da zatvorene sva tri otvora daju tonove **g**, **d¹**, **g¹**, **h¹**, **d²**, **g²**, **a²** i **h²**, koji predstavljaju niz svojstvenih frekvencija u cevi otvorenoj sa oba kraja. U zavisnosti od načina duvanja proizvodi se veći ili manji pritisak vazduha koji počinje da osciluje na vrhu klina. Upravo će intenzitet pritiska odrediti koja će harmonijska frekvencija imati najveću amplitudu oscilovanja. Najmanjem pritisku odgovara **g**, sledećem većem frekvencija tona **d¹**, i tako redom.

Uslovi oscilovanja tonova **a**, **h** i **c¹** su nešto drugačiji od uslova oscilovanja **g**, jer otvoreni prvi, dva i sva tri otvora skraćuju vzdušni stub bočno. Iz tog razloga ove kombinacije otvora daju tonove sa manjim brojem viših harmoničnih frekvencija. Zato u datom opsegu muzičkih tonova osnovni tonovi **a**, **h** i **c¹** sadrže po dve harmonične frekvencije. Instrument kao celina daje i više viših harmoničnih frekvencija ali se one sviranjem ne mogu izdvojiti. Njihov sastav je određen kvalitetom izrade instrumenta, gustinom drveta, odnosom veličine bočnih otvora i prečnika cevi, izborom laka i drugim nekim faktorima.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio da se pokaže primena stojećih zvučnih talasa na izradu i analizu muzičkog instrumenta sa područja Slovačke republike – Fujara. Pri izradi kraće verzije ovog instrumenta koristio sam i empirijske podatke iskusnih majstora.

Na osnovu vlastite izrade Fujare, moguće je izvesti određene zaključke.

- Empirijske jednačine određuju dimenzije instrumenta koje se u dobroj meri slažu sa proračunima za određivanje pozicija bočnih rupa (na tim mestima nastaju trbusi stojećih talasa). Pri ovome, korekcije samog štimanja se odnose na nesavršenosti empirijskih formula u kojima je brzina zvuka određena kao konstanta, a ne uzima se u obzir uticaj temperature i sastava vazduha, pre svega povećane koncentracije vodene pare i ugljendioksida, koja je povišena usled izdisanja iz pluća.
- Sama izrada cevi instrumentatakođe utiče na kvalitet tona ali pre svega na boju tona. Ako su uutrašnji zidovi glatko obrađeni, vazduh lako struji bez značajnijih vrtloženja koja bi izazvala prateće „šuštanje“. Ovo poslednje je nemoguće eliminisati i zbog prisutne viskoznosti vazduha u cevi koja u maloj meri „kviri“ idealan talasni front. Prisutnost blagog „šuštanja“ je i poželjna prateća nijansa zvuka ovog instrumenta.
- Na instrumentu u mojoj izvedbi nedostatak glasnice, koja je svakako najbitniji deo instrumenta, je u tome što je kanalić izrađen na debljini od preko jednog milimetra (1,1 – 1,2 mm) čime je bitno smanjena osetljivost. Zbog toga je neophodno jače duvanje sa dovoljnom količinom vazduha kako bi se proizveo odgovarajući ton. Na smanjenu osetljivost je uticala i obrada prozora glasnice oblika kvadrata (a trebalo bi da bude oblika pravougaonika)
- Pri bušenju cevi postignuti prečnik je 18 mm usled nedostatka odgovarajućeg svrdla, dok bi prema proračunu trebalo da iznosi 15 mm. Dužina panja je 54 mm, što je uz predstavljene korekcije (na strani 28) tačna vrednost. Dužina cevi iznosi 825 mm. Pozicije bočnih otvora su 139 mm, 222.5 mm, 259.5mm posmatrano od donjeg kraja.

Izrada i popravka frula i žičanih muzičkih instrumenata pored osnovnog zanimanja predstavlja moj omiljeni hobi. To je bio osnovni podsticaj za izbor teme ovog diplomskog rada.

6. LITERATURA

[1] David M. Howard, Jamie Angus, Acoustic and Psychoacoustics – third edition, Focal Press publications, Great Britan, reprinted 2007

[2] Božidar Žižić, Kurs opšte fizike – fizička mehanika, četvrto izdanje, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1987

[3] Agneš Kapor, Dragan Nikolić, Eksperimentalne vežbe iz fizike, mehanika i termodinamika, Univerzitet u Novom Sadu, PMF, 2000

[4] Milan O. Raspoović, Fizika za treći razred gimnazije prirodno-matematičkog smera, zavod za udžbenike Beograd 2007

[5] Ladislav Leng Hrame na fujare ,

Fujary, píšťalky, Michal Fil'o , Ústredie ľudovej umeleckej výroby, Bratislava 2004

http://tesla.pmf.ni.ac.rs/f_odeljenje/ucenicki%20folder/ucenici2009-2010/osc2009.pdf

www.fujera.sk

www.ofujarach.szm.com

newt.phys.unsw.edu.au Open vs. Closed pipes

www.math.sk/mpm/download/diplomovka_tomek.pdf

<https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustics>

https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_acoustics

<https://sr.wikipedia.org/sr-el/Zvuk>

<https://sr.wikipedia.org/wiki/Talas>



Branislav Kovač rođen je 14.09.1982.godine u Bačkoj Palanci. Pohađao je osnovnu školu „Vuk Karadžić“ i Gimnaziju „20.Oktobar“ u Bačkoj Palanci. Nakon srednjoškolskog obrazovanja upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, smer profesor fizike. U tom periodu počinje i njegova aktivnost u *KUD-u Šafarik* gde se bliže upoznaje sa fujarom i počinje da uči da svira na njoj. Posle upisa apsolventskog povremeno radi u osnovnim i srednjim školama, a u jednom periodu i kao radnik u stolarskoj radionici. Od tada se aktivno bavi obradom drveta, popravkama i pravljenjem muzičkih instrumenata.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj:
RBR

Identifikacioni broj:
IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ

Vrsta rada: Diplomski rad
VR

Autor: Branislav Kovač
AU

Mentor: prof.dr Srđan Rakić
MN

Naslov rada: Akustičke osobine slovačkog nacionalnog muzičkog
instrumenta - FUJARA
NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)
JP

Jezik izvoda: srpski/engleski
JI

Zemlja publikovanja: Srbija
ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina
UGP

Godina: 2016
GO

Izdavač: Autorski reprint
IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja
Obradovića 4, Novi Sad
MA

Fizički opis rada: 6 poglavlja/ 33 stranice/28 slika/1 tabela
FO

Naučna oblast: Fizika
NO

Naučna disciplina: Akustika
ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Fujara, stojeći talasi, glasnica,
PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU

Važna napomena: nema
VN

Izvod: Fujara kao duvački instrument funkcioniše na principu
oscilovanja stojećih talasa. U ovom radu izložene su
IZ

osnovne karakteristike i način izrade ovog muzičkog instrumenta.

Datum prihvatanja teme od NN veća: 30.12.2015

DP

Datum odbrane: 15.01.2016

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Član

Član

dr. Željka Cvejić , vanredni profesor

dr. Srđan Rakić , redovni profesor

dr. Miodrag Krmar , redovni profesor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO
Identification number:
INO
Document type: Monograph publication
DT
Type of record: Textual printed material
TR
Content code: Final paper
CC
Author: Branislav Kovač
AU
Mentor/comentor: prof.dr Srđan Rakić
MN
Title: Acoustic properties of the Slovak national musical
instrument - fujara
TI
Language of text: Serbian (Latin)
LT
Language of abstract English
LA
Country of publication: Serbia
CP
Locality of publication: Vojvodina
LP
Publication year: 2016
PY
Publisher: Author's reprint
PU
Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja
Obradovića 4, Novi Sad
PP
Physical description:
PD
Scientific field: Physics
SF
Scientific discipline: Acoustic
SD
Subject/ Key words: Fujara, standing waves, flue,
SKW
UC
Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja
Obradovića 4
HD
Note: none
N
Abstract: Fujara as a wind instrument works on principle standing
waves oscillation. In this paper are exposed basic
AB

characteristics and the way of making this musical instrument.

Accepted by the Scientific Board: 30.12.2015.

ASB

Defended on: 15.01.2016.

DE

Thesis defend board:

DB

President: dr. Željka Cvejić , associate professor

Member: dr. Srđan Rakić , full professor

Member: dr. Miodrag Krmar , full professor