Fizika glazbe

Dušić, Vanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:376565

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek

zir.nsk.hr

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



VANJA DUŠIĆ

FIZIKA GLAZBE

ZAVRŠNI RAD

Osijek, 2018.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



VANJA DUŠIĆ

FIZIKA GLAZBE

ZAVRŠNI RAD

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja prvostupnika

Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom mentorice doc. dr. sc. Maje Varge Pajtler u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija Fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Zahvale

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Maji Vargi Pajtler na strpljenju, susretljivosti, pomoći i vodstvu tijekom pisanja ovog završnog rada te brojnim savjetima koji su mi olakšali pisanje.

Zahvaljujem se svojim kolegicama i kolegama na pomoći prilikom studiranja te se posebno zahvaljujem kolegi i prijatelju Dejanu Gemeriju koji mi je bio velika potpora tijekom studija.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i supruzi Lauri na podršci.

Najveću zahvalnost izražavam svojim roditeljima Branimiru i Sanji Dušić koji su vjerovali u mene i uvijek bili potpora u svim trenucima. Hvala im na strpljenju, bez njihove pomoći moja se postignuća nikada ne bi ostvarila.

V.D.

Sadržaj

1. UVOD 1

2. VALOVI 2

2.1. TRANSVERZALNI VALOVI 3
2.2. LONGITUDINALNI VALOVI 4

3. AKUSTIKA 5

4. ZVUK 5

4.1. LJUDSKO UHO I ZVUK 5
4.2. BRZINA ZVUKA 7
4.3. IZVORI ZVUKA ODNOSNO ZVUČNI VALOVA 8
4.4. STOJNI LONGITUDINALNI VALOVI 8
4.5. HARMONICI 9

5. GLAZBA 15

5.1. GLAZBENA LJESTVICA 15
5.2. GLAZBENI INSTRUMENTI ILI GLAZBALA 16

6. ZAKLJUČAK 22

7. LITERATURA 23

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera Završni rad

Odjel za fiziku

FIZIKA GLAZBE

VANJA DUŠIĆ

Sažetak

Glazba je umjetnost čiji je medij zvuk. Smatra se jednom od najstarijih umjetnosti koja se koristi u različite svrhe – zabavljačke, religijske, komunikacijske itd. Ovaj se završni rad temelji na proučavanju zvukova, tj. njihovim karakteristikama poput brzine, jakosti, kvalitete, boje i frekvencije čije razumijevanje može produbiti znanje o glazbi. Kako je zvuk longitudinalni val, bilo je bitno proučiti načine širenja valova te njihova svojstva. Veliku važnost u glazbi ima i akustika, tj. područje fizike koje se bavi načinima dobivanja zvukova i zakonima njihovog širenja. Glavni izvori zvukova jesu glazbeni instrumenti. U ovom je završnom radu napravljena glavna podjela glazbenih instrumenata prema nastanku zvuka te su opisana svojstva instrumenata i načini na koje istrumenti proizvode zvukove.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: akustika/glazba/glazbeni instrumenti/valovi/zvuk

Mentorica: doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen: odlukom Odbora za završne radove

University Josip Juraj Strossmayer Osijek Bachelor of Physics Thesis

Department of Physics

FIZIKA GLAZBE

VANJA DUŠIĆ

Abstract

Music is art whose media is sound. It is considered to be one of the oldest arts used for various purposes - entertainments, religions, communication etc. This Bachelor thesis is based on the study of sounds, ie their characteristics such as speed, strength, quality, color and frequency whose understanding can deepen the knowledge of music. As sound is a longitudinal wave, it was also important to study the ways how waves are spread and their properties. Of great importance in music there is also acoustics, the field of physics dealing with the ways of making sounds and the laws of their spread. The main sources of sounds are musical instruments. In this Bachelor thesis, the main division of musical instruments has been made according to sound formation, the characteristics of the instruments are described and it is presented the ways instruments are producing sound.

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: acoustics/music/musical instruments/sound/waves

Supervisors: doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler

Reviewers:

Thesis accepted: by decision of the Committee for Bachelor thesis

1. UVOD

U ovom završnom radu govorit će se o fizici glazbe, tj. načinu funkcioniranja glazbenih instrumenata. Kako bi se objasnio način nastajanja zvuka morat će se objasniti neki pojmovi poput valova, titranja, akustike i dr. Uz to, pojasnit će se i pojedini instrumenti, kako i na koji način proizvode zvuk.

2. VALOVI

Jedan od najraširenijih prirodnih fenomena jesu valovi. Najčešće ih čovjek spominje kada se nalazi u blizini neke rijeke ili mora, kada je val uistinu vidljiv. Međutim, osim već spomenutih vidljivih, razlikujemo i nevidljive valove – elektromagnetske valove te valove zvuka. Vremenom su znanstvenici uz pomoć eksperimenata otkrili sve više informacija koje su pomogle u razvitku civilizacije. Primjerice, tehnologija ne bi dostigla ovakvu razinu kakvu danas ima bez proučavanja elektromagnetskih valova.

Svim valnim pojavama način nastajanja je isti, one nastaju titranjem. Titranje je periodično gibanje tijela po putanji koje se ponavlja. Posebno se ističe harmoničko titranje koje se odvija po zakonu sinusa, a nastaje kao posljedica ako je sila koja izvodi titranje razmjerna udaljenosti tijela od ravnotežnog položaja, tj. elongaciji. Kada bi postojalo mnoštvo harmoničkih oscilatora koji su poredani jedan do drugoga i kada bi se prvi pobudio, dogodilo bi se širenje poremećaja u prostoru – nastala bi jedna od najraširenijih pojava u prirodi, a to je val. Kako bi se moglo objasniti kako nastaju valovi te njihova podjela, moraju se prvo objasniti neki pojmovi kao što su elastična tijela, valna ravnina, valna zraka i dr.

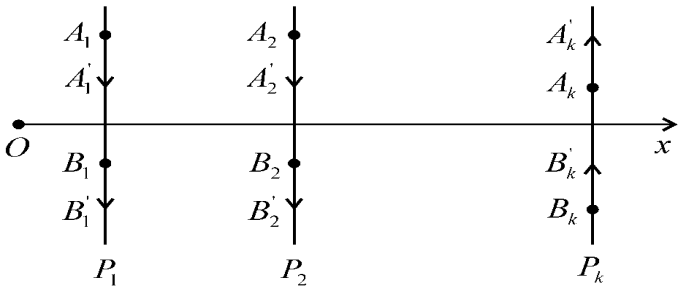
Elastična tijela jesu tijela putem kojih se valovi mogu širiti. Takva se tijela nakon kratkotrajnog djelovanja sile, koja deformira odnosno izobliči tijelo, vraćaju u svoj početni oblik. Čestice koje izgrađuju elastična tijela povezane su elastičnim vezama. Deformacija jedne čestice utjecat će na drugu odnosno susjednu česticu, ta druga na svoju susjednu i tako redom što će u konačnici uzrokovati širenje deformacije odnosno poremećaja prostorom. Poremećaj možemo još nazvati i valnim pulsom, a on se zbog inercije čestica neće prenositi trenutno, nego će se prenositi brzinom koja ovisi o elastičnim svojstvima tvari. Dakle val je širenje poremećaja prostorom koji može biti pravilan ili nepravilan, a valno gibanje prijenos je energije i količine gibanja iz jedne točke prostora u drugu, ali bez prijenosa tvari.

Kod širenja vala čestice medija kojim se val širi pomiču se vrlo malo oko svog ravnotežnog položaja. Zbog toga nije bitna brzina i smjer gibanja pojedinih čestica nego brzina kojom se poremećaj proširio medijem odnosno sustavom. Uzmimo za primjer kretanje automobilske kolone iz mirovanja. Ako promatramo automobile koji idu prema naprijed, prividno će nam se stvoriti slika vala (razmak između automobila), tj. poremećaja koji se kreće prema unazad. Brzina tog poremećaja ne ovisi o brzini pojedinog automobila, nego ovisi o brzini reakcije vozača na pomicanje onog vozila ispred.

Vrste valova razlikuju se u ovisnosti o odnosu između valne ravnine i valne zrake. Valna ravnina je ravnina u kojoj materijalne točke imaju jednake vektore pomaka, a valna zraka je pravac koji je nositelj brzine širenja vala odnosno pravac koji pokazuje smjer širenja vala. Tako razlikujemo transverzalne i longitudinalne valove.

2.1. Transverzalni valovi

Transverzalni ili poprečni valovi jesu valovi kod kojih čestice titraju okomito na smjer širenja vala (Slika 1). Vektori pomaka materijalnih točaka leže u valnim ravninama, tj. vektori pomaka okomiti su na valnu zraku.



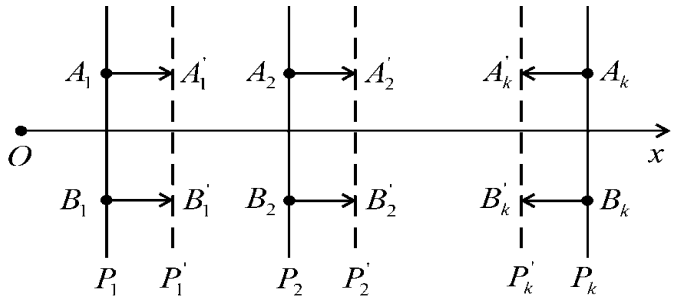
Slika 1: Grafički prikaz pravca širenja transverzalnog vala te gibanja točaka na valu. A1 i A1', B1 i B1', A2 i A2', B2 i B2', tj. Ak i Ak' odnosno Bk i Bk' prikazuju točke koje titraju, a pravac Ox označava smjer širenja tog vala. [8]

Transverzalni su valovi mogući samo u tijelima čvrstog stanja zato što su za pojavu transverzalnog vala potrebne sile koje se protive pomicanju jednog sloja sredstva prema susjednom sloju. Zbog toga transverzalni valovi ne mogu nastajati u fluidima jer su takve sile u fluidima zanemarive.

Primjeri transverzalnih valova jesu valovi na vodi te valovi na užetu, a najpoznatiji primjer transverzalnih valova jesu elektromagnetski valovi. Bitno je nadodati da za širenje elektromagnetskih valova nije potreban medij. Na putu kojim se oni šire ne trebaju titrati čestice medija jer pri širenju elektromagnetskih valova međusobno okomito titraju električna i magnetska komponenta polja.

2.2. Longitudinalni valovi

Longitudinalni ili uzdužni valovi jesu valovi kod kojih je smjer titranja čestica jednak smjeru širenja vala (Slika 2). Drugim riječima, to su valovi čiji je vektor pomaka čestica sredstva okomit na valnu ravninu odnosno paralelan s valnom zrakom.



Slika 2: Grafički prikaz pravca širenja longitudinalnog vala te gibanja točaka na valu. A1 i A1', B1 i B1', A2 i A2', B2 i B2', tj. Ak i Ak' odnosno Bk i Bk' prikazuju točke koje titraju, a pravac Ox označava smjer širenja tog vala. [8]

Longitudinali se valovi, za razliku od transverzalnih, mogu širiti u sredstvima svih agregatnih stanja – čvrsto, tekuće i plinovito. Kao primjer longitudinalnih valova uzimamo već gore spomenutu kolonu automobila (automobili se kreću prema naprijed dok se poremećaj kreće prema nazad), vlak na kojeg se priključuje lokomotiva (pomak od udarca lokomotive prenosi se od vagona do vagona), elastična opruga koju smo zatitrali (lijevo-desno šire se poremećaji u obliku zgušnjenja i razrjeđenja) itd. Kao najbitniji primjer longitudinalnog vala promatrat ćemo valove zvuka.

3. AKUSTIKA

Akustika je područje fizike koje se bavi načinima dobivanja zvuka i zakonima njegovog širenja. Titranje čvrstih tijela u fluidu i zraku proizvodi longitudinalne valove pomaka koje uho zamjećuje kao zvuk ili šum. Taj se zvuk može gibati samo u područjima gdje ima tvari odnosno molekula jer one čine medij kojim se zvuk giba. Stoga prostiranje zvuka u vakuumu nije moguće, što se može dokazati vrlo jednostavnim pokusom. Postavi se izvor zvuka u zatvorenu staklenu posudu. Nakon što se iz te staklene posude isiše zrak, stvorit će se vakuum, a zvuk se neće čuti, zbog čega se može zaključiti da se u vakuumu zvuk ne može širiti jer nema čestica koje će ga prenositi.

4. ZVUK

Zvuk je dio naše svakodnevnice, a detektiramo ga uz pomoć sluha. Neke od karakteristika zvuka jesu brzina, jakost, kvaliteta, boja i frekvencija. Za daljne razumijevanje potrebno je definirati pojmove poput elongacije, amplitude i frekvencije. Elongacija ili pomak odnosno izduženje udaljenost je tijela od ravnotežnog položaja, a maksimalna elongacija naziva se amplituda. Frekvencija označava ukupan broj titranja u sekundi.

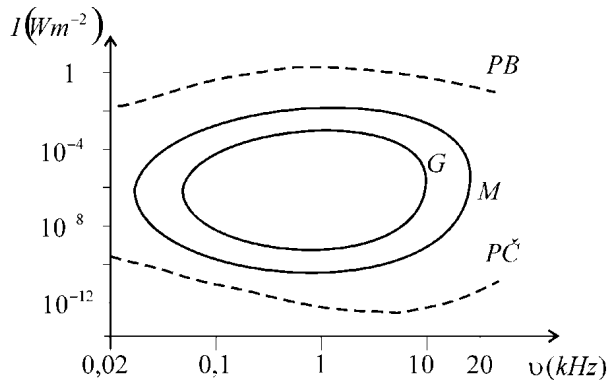
4.1. Ljudsko uho i zvuk

Frekvencija titranja čestica koja je čujna ljudima u rasponu je od 20 Hz pa sve do 20000 Hz. Prag osjetljivosti pojedinog čovjeka ispituje se povećavanjem intenziteta sinusnog tona za pojedine frekvencije. Kada se dosegne maksimalna vrijednost koju slušatelj čuje, otkrije se prag osjetljivosti odnosno čujnosti za danu frekvenciju. To je jakost zvuka koja je potrebna da zvuk određene frekvencije izazove osjećaj zvuka kod čovjeka. Daljnjim povećavanjem jakosti zvuka, odnosno intenziteta, slušatelj u svojim ušima više neće čuti zvuk nego će osjetiti bol. Time se postiže prag bola ili bolnog osjeta. To je ona jakost zvuka pri kojoj čovjek čuje zvuk uz neugodan osjećaj koji se pretvara u bol ako se jakost zvuka malo poveća. Stariji ljudi gube osjetljivost na frekvencije zvuka iznad 10000 Hz (Slika 3).

Jakost zvuka (I) odnosno tok akustične energije, tj. intenzitet vala razmjeran je kvadratu frekvencije (f) i kvadratu amplitude (A), kao i brzini zvuka (v) te gustoći fluida (ρ), a dan je izrazom (1).

$$I = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \rho \cdot v \qquad (1)$$

On predstavlja energiju koja s valom prođe kroz poprečni presjek po jedinici plošine i jedinici vremena, a izražava se jedinicama W/m^2.



Slika 3: Graf prikazuje krivulje praga čujnosti (PČ) i boli (PB) te područja jakosti za govor (G) i glazbu (M). Područja za ljudski glas i glazbene instrumente uglavnom se nalaze između 80 Hz i 10000 Hz. Prag čujnosti za zvuk frekvencije od 1000 Hz iznosi $I = 10^{-12}$ W/m^2. [8]

Razina jakosti zvuka (J) izražava se u belima (B) odnosno u decibelima (dB). Dva se zvučna signala razlikuju u intenzitetu za jedan bel ako je omjer njihovih intenziteta deset. Matematički izraz za računanje razine jakosti zvuka dan je izrazom (2),

$$J = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{(dB)}, \qquad (2)$$

pri čemu je prag čujnosti $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2.

Ljudsko je uho instrument koji registrira zvukove intenziteta $I = 10^{-12}$ W/m^2 do $I = 1$ W/m^2, a najosjetljivije je za frekvencije od 600 Hz do 6000 Hz. Područje frekvencija koje se nalazi ispod 20 Hz naziva se infrazvuk, a iznad 20000 Hz naziva se ultrazvuk.

4.2. Brzina zvuka

Brzina zvuka jest brzina koja pokazuje koliko se brzo poremećaj kreće od čestice do čestice odnosno koliko se brzo poremećaj širi prostorom. Ona je definirana kao udaljenost koju točka vala prijeđe u jedinici vremena, a izražena je u metrima po sekundi.

Ako se radi o medijima u istom agregatnom stanju, zvučni val bit će brži u medijima koji imaju manju gustoću materijala od onih koji imaju veću gustoću.

Brzina zvuka ovisi o inercijskim i elastičnim svojstvima medija. Najbolji primjer inercijskog svojstva jest gustoća medija kojim zvučni val putuje. Što je inercija odnosno gustoća pojedinih čestica medija manja, val će biti brži.

Brzina zvuka najveća je u čvrstim tijelima, nešto je manja u tekućinama, a najmanja u plinovima. Elastično svojstvo medija utječe na to da će zvučni val odnosno zvuk biti brži u onim materijalima koji se manje deformiraju kada je na njih primijenjena sila. Kao primjer možemo uzeti čelik i gumu. Zvuk će putovati brže čelikom jer je on tvrd i krut za razliku od gume koja je fleksibilna.

Prvo uspješno mjerenje brzine zvuka u zraku izvedeno je početkom 18. stoljeća u Francuskoj kada je dobivena srednja brzina zvuka 332 m/s. Izvedeno je između dva brijega u Parizu, na udaljenosti od 23 km. Na jednom je brijegu ispaljen topovski hitac, a na drugom je mjereno vrijeme između pojave bljeska i dolaska zvučnog praska. Do pogreške mjerenja došlo je zbog neodređenosti temperature zraka jer brzina zvuka u zraku ovisi o svojstvima zraka, najviše o temperaturi i vlažnosti.

Može se pokazati da je brzina zvuka u plinu proporcionalna kvadratnom korijenu temperature plina:

$$v = v_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}}, \qquad (3)$$

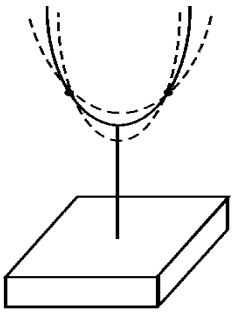
pri čemu je v_0 brzina širenja poremećaja, a T_0 standardna temperatura koja iznosi T_0 = 273,15 K.

4.3. Izvori zvuka odnosno zvučni valova

Izvor zvuka elastični je sustav koji uzbuđen na mehanički, električni ili fiziološki način titra određenom frekvencijom, a takav sustav u dodiru s atmosferom daje ton. Ton je glazbeni zvuk koji je okarakteriziran određenom frekvencijom, koja je stalna u nekom duljem intervalu vremena. S druge strane, zvuk koji ne potječe od periodičnih titraja i kojemu se period, tj. frekvencija i amplitude brzo mijenjaju zove se šum. Najjednostavniji izvori longitudinalnih sinusnih valova jesu longitudinalna titranja štapa. Primjer može biti čelični cilindrični štap kojeg se udari uzdužno po jednom kraju. Tako se potakne da se kroz njega kreće poremećaj.

Nastajanje i širenje zvučnih valova mogu se prikazati i glazbenom vilicom (Slika 4). To je plosnata šipka svinuta u obliku slova „u“ koja stvara zvučni val vibriranjem krakova naprijed i nazad. Na takav način uznemiruje molekule zraka koje su medij za širenje zvučnog vala. Kratkotrajnom deformacijom njezinih krakova, udaranjem po njima ili približavanjem i naglim otpuštanjem, oni će početi titrati osnovnom frekvencijom – dva čvora i tri trbuha (čvorovi su točke vala u kojima amplituda ima najmanji iznos, a trbusi su točke vala u kojima amplituda ima najveći iznos).

Približno vrijedi da male vilice daju visoke tonove.

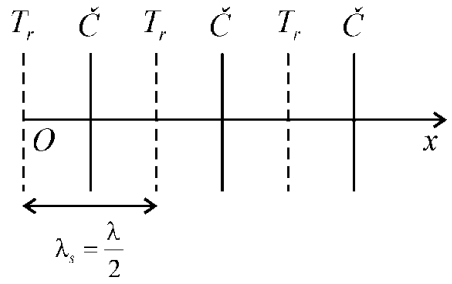


Slika 4: Glazbena vilica koja titra osnovnom frekvencijom. [8]

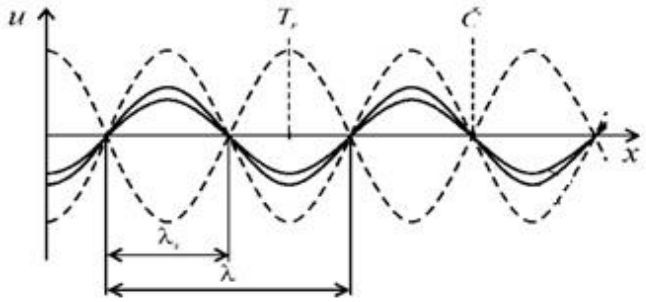
4.4. Stojni longitudinalni valovi

Poznavanje stojnih longitudinalnih valova olakšava razumijevanje harmonika, na čijem se principu temelji nastanak zvuka kod glazbenih instrumenata. Stojni valovi jesu valovi koji nastaju interferencijom odnosno zbrojem dvaju valova jednakih amplituda i valnih duljina, a koji putuju

na istom pravcu jedan prema drugome. Slike 5 i 6 prikazuju grafičke prikaze stojnog vala s istaknutim čvorovima (Č) i trbusima (Tr).



Slika 5: Grafički prikaz stojnog vala: Tr predstavljaju trbuhe stojnog vala (mjesta najvećih amplituda) dok Č predstavljaju čvorove stojnog vala (mjesta na kojima su pomaci stalno nula). [8]



Slika 6: Grafički prikaz stojnog vala: λs je prostorni period stojnog vala odnosno udaljenost između dva susjedna čvora, a ona je jednaka polovici perioda progresivnog vala λ. [8]

4.5. Harmonici

Razumijevanje harmonika olakšava opisivanje stvaranja zvuka kod glazbenih instrumenata. Harmonici su povezani različitim matematičkim omjerima (cijelih brojeva) frenkvencija kod glazbenih instrumenata. Kako bismo bolje razumjeli harmonike, razmotrimo primjer štapa duljine *L* koji longitudinalno titra nakon što je pobuđen nizom impulsa harmonijske sile uzdužno. Posljedično, u njemu se pojavljuje sinusni val pomaka, a nakon reflektiranja na krajevima štapa nastaju sinusni stojni valovi. Način njegovog titranja ovisit će o tome jesu li njegovi krajevi slobodni ili učvršćeni. Razlikuju se tri slučaja – u prvom slučaju oba su kraja slobodna, u drugom

slučaju oba učvršćena, a u trećem slučaju jedan je kraj učvršćen, a drugi slobodan. Frekvencije kojima titra slobodni štap odnose se kao cijeli brojevi.

1. slučaj – <u>oba kraja slobodna</u>

U prvom slučaju, kada su oba kraja štapa slobodna, na njegovim krajevima nalaze se trbusi, a između njih čvorovi. Broj čvorova određuje frekvencije titranja.

a) Kada se između trbuha nalazi samo jedan čvor, na cijelu dužinu štapa stane samo pola valne duljine (Slika 7 a), tj.

$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad \rightarrow \qquad \lambda = 2 \cdot L\,. \tag{4}$$

Znamo od prije vezu između brzine, frekvencije i valne duljine:

$$v = f \cdot \lambda\,, \tag{5}$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}\,, \tag{6}$$

pri čemu je E Youngov modul elastičnosti.

Iz izraza (5) izrazi se λ i dobiveni izraz izjednači se s izrazom (4):

$$\lambda = \frac{v}{f_1} = 2 \cdot L\,, \tag{7}$$

a sada iz izraza (7) izrazi se f_1 i umjesto v uvrsti izraz (6) te se dobije najmanja frekvencija kojom štap može slobodno titrati, f_1:

$$f_1 = \frac{v}{2 \cdot L} = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}\,. \tag{8}$$

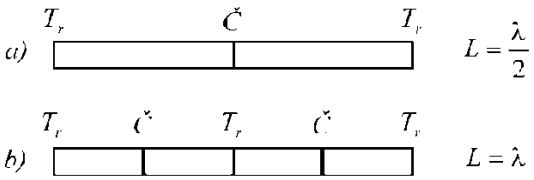
To se naziva osnovna frekvencija promatranog sustava, u ovom slučaju štapa, ili prvi harmonik.

b) Kada se između trbuha nalaze dva čvora, na cijelu duljinu štapa stane cijela valna duljina (Slika 7 b), tj.

$$L = \lambda. \qquad (9)$$

Ponovno se koriste izrazi (5) i (6) te analogno ranijem izvodu slijedi izraz za prvu višu harmoničku frekvenciju ili drugi harmonik, f_2:

$$f_2 = \frac{v}{L} = \frac{1}{L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2 \cdot f_0 . \qquad (10)$$



Slika 7: Stojni valovi na šipci slobodnoj na oba kraja; na oba kraja šipke nalaze se trbusi, tj. slobodna su oba kraja šipke. U slučaju a) prikazan je jedan čvor između dva trbuha na cijeloj dužini štapa, tj. titranje osnovnom frekvencijom, a u slučaju b) imamo dva čvora i tri trbuha na cijeloj dužini, tj. prvi viši harmonik. [8]

Glazbalo koje funkcionira kao u primjeru štapa koji ima oba slobodna kraja je ksilofon (Slika 8).



Slika 8: Ksilofon. [13]

Slično se dobiju i izrazi za treći, četvrti i svaki sljedeći harmonik. Frekvencija *n*-tog harmonika bit će dana izrazom:

$$f_n = n \cdot f_0. \qquad (11)$$

2. slučaj – <u>oba kraja učvršćena</u>

U slučaju kada su oba kraja učvršćena, na krajevima se nalaze čvorovi, a između njih može se nalaziti jedan ili više trbuha.

Kada se između čvorova nalazi samo jedan trbuh, na cijelu dužinu štapa stane samo pola valne duljine (Slika 9), tj.

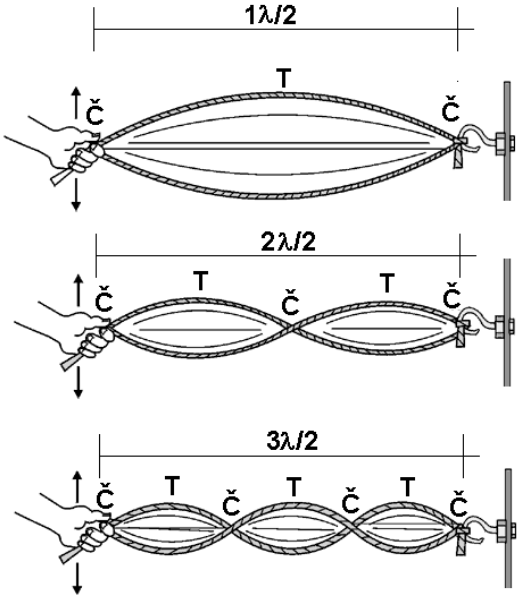
$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad \rightarrow \qquad \lambda = 2 \cdot L \,. \tag{12}$$

Nakon cijelog izvoda, koji se slično provodi kao i u prethodnom slučaju, dobije se izraz za osnovnu frekvenciju promatranog sustava, tj. prvi harmonik:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \,. \tag{13}$$

Sve navedeno ne odnosi se samo na štap već i na žicu učvršćenu na krajevima, pa općenito vrijedi:

$$f_n = \frac{1}{n \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \,. \tag{14}$$



Slika 9: Stojni valovi na užetu: prikazani su slučajevi kada se na oba kraja nalaze čvorovi (učvršćena su oba kraja užeta). Ako se na jednoj duljini nalaze dva čvora tada postoji samo jedan trbuh – osnovni harmonik; ako se nalaze tri čvora tada postoje dva trbuha – prvi viši harmonik; ako se nalaze četiri čvora tada postoje tri trbuha – drugi viši harmonik. [4]

Glazbalo koje funkcionira kao u gornjem primjeru je gitara (Slika 10).



Slika 10: Gitara. [10]

3. slučaj - jedan kraj štapa je učvršćen, a drugi slobodan

U ovom se slučaju na učvršćenom kraju nalazi čvor, a na slobodnom trbuh.

Kada između krajeva štapa nema ni trbuha ni čvora, na cijelu duljinu štapa stane četvrtina valne duljine (Slika 11), tj.

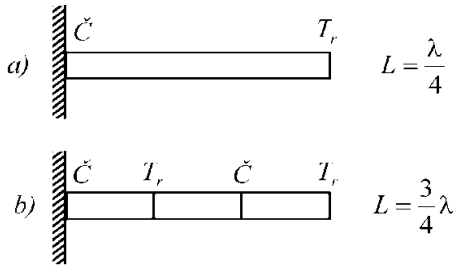
$$L = \frac{\lambda}{4} \qquad \rightarrow \qquad \lambda = 4 \cdot L\,. \tag{15}$$

Nakon cijelog izvoda, koji se slično provodi kao ranije, dobije se izraz za osnovnu frekvenciju promatranog sustava, tj. prvi harmonik:

$$f_1 = \frac{1}{4 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}\,. \tag{16}$$

Općenito vrijedi:

$$f_n = \frac{n}{4 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}\,. \tag{17}$$



Slika 11: Stojni valovi na štapu učvršćenom na jednom kraju: prikazani su slučajevi kada se na jednom kraju nalazi čvor, a na drugom trbuh. U slučaju a) na štapu nalaze se samo jedan čvor i jedan trbuh – osnovni harmonik, a u slučaju b) nalaze se dva čvora i dva trbuha – prvi viši harmonik. [9]

Glazbalo koje funkcionira kao u gornjem primjeru je harmonika (Slika 12). Glavni dijelovi koji su zaslužni za stvaranje zvuka jesu mijeh i jezičci koji se nalaze sa svake strane mijeha. Zvuk nastaje tako što se razvlačenjem ili skupljanjem mijeha tjera zrak do jezičaka koji ih izaziva da zvuče.



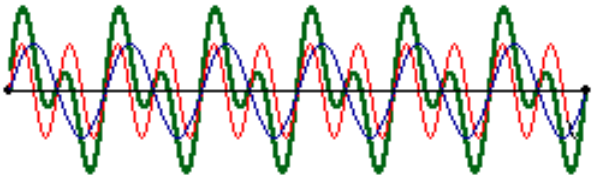
Slika 12: Harmonika. [5]

5. GLAZBA

Glazba je umjetnost koja se rijetko sastoji od zvučnih valova jedne frekvencije koji se redom izvode. Ona se sastoji od tonova, a udaljenosti u visini između bilo koja dva tona nazivaju se intervali.

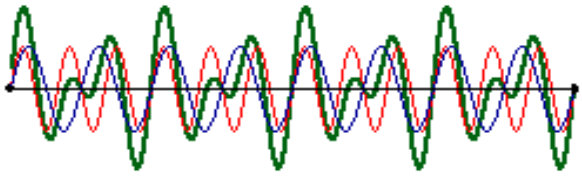
5.1. Glazbena ljestvica

Najjednostavnijim primjerom pokušat ćemo objasniti osnovnu prirodu glazbe – promotrit ćemo dva zvučna vala čije se frekvencije odnose kao 2:1. Ova kombinacija valova (tj. omjer frekvencija) poznata je kao oktava (Slika 13).



Slika 13: Frekvencija crvenog vala dvostruko je veća od frekvencije plavoga vala. Ta dva vala interferiraju odnosno zbrajaju se i tako nastaje zeleni val koji ima periodičan ponavljajući uzorak. [12]

Kvinta je glazbeni interval kod kojeg se frekvencije zvučnih valova odnose kao 3:2 (Slika 14).



Slika 14: Rezultirajući zeleni val nastao je interferiranjem crvenog i plavog koji imaju pravilan matematički omjer izmedu frekvencija jednog i drugog vala. [12]

Ostali glazbeni intervali i pripadajući omjeri frekvencija dani su u Tablici 1.

Tablica 1: Omjeri frekvencija pri pojedinim glazbenim intervalima

Intervali	Omjeri frekvencija
Prima	1:1
Sekunda	9:8
Terca	5:4
Kvarta	4:3
Kvinta	3:2
Seksta	5:3
Septima	15:8
Oktava	2:1

Ovih 8 navedenih glazbenih intervala nazivaju se jednostavnim intervalima. Intervalima kojima je razmak između tonova veći od oktave spadaju u složene intervale, kao npr. nona (razmak od 9 tonova), decima (razmak od 10 tonova), undecima (razmak od 11 tonova) itd.

5.2. Glazbeni instrumenti ili glazbala

Glazbeni instrumenti ili glazbala jesu izvori zvuka koji proizvode stojne valove, a ne daju samo harmonijski val nego i cijeli niz viših tonova odnosno viših harmonika. Zvukovi koje proizvode glazbala razlikuju se prema:

a) kvaliteti
b) boji tona ili timbre – karakterizira ga zastupljenost viših harmonika i njihove relativne amplitude
c) visini zvuka ili frekvenciji

Kvaliteta zvuka je karakteristika koja razlikuje načine nastajanja zvuka kao što su glas ili glazbeni instrument – žičana glazbala, puhačka glazbala ili udaraljke. Kvaliteta i boja zvuka određeni su oblikom zvučnog vala, a oni ovise i o broju te vrsti i zastupljenosti viših frekvencija. Što je frekvencija tona viša, veća je i visina tona.

Glazbala se dijele u tri glavne skupine prema načinu nastanka zvuka:

a) žičana glazbala (npr. gitara, klavir, violina)
b) puhačka glazbala (npr. trombon, truba, flauta, saksofon)
c) udaraljke

a) Žičana glazbala

Žičana glazbala jesu sva ona glazbala kod kojih se zvuk proizvodi okidanjem, tj. trzanjem žica ili gudanjem po žicama. Uzmimo za primjer gitaru. Stvoriti se zvuk na njoj može tako da se položajem prsta na gitari odnosno na pragu gitare mijenja duljina žice, a time i pripadna frekvencija zvuka. Istovremeno se drugom rukom trzanjem pobuđuju žice na titranje. Frekvencija svake žice ovisi o njezinoj napetosti, gustoći i duljini.

Uzmimo za primjer žicu gitare dugačku 80 cm i neka je njezina osnovna frekvencija, njezin prvi harmonik, f_1 = 400 Hz. Tada je valna duljina prvog harmonika dva puta veća od duljine žice, tj. valna duljina iznosi 160 cm. Iz toga se može izračunati brzina stojnog vala, a ona iznosi:

$$v = \lambda \cdot f = 640 \text{ m/s}. \qquad (18)$$

Promjena frekvencije ili valne duljine neće uzrokovati promjenu brzine. Frekvencija drugog harmonika može se izračunati uz pomoć brzine stojnog vala i valne duljine:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2}. \qquad (19)$$

Ona iznosi f_2 = 800 Hz. Slično se računa frekvencija i za treći harmonik kojemu je valna duljina λ = 0,533 m (f_3 = 1200 Hz). Analogno možemo izračunati frekvencije ostalih harmonika.

Primijetimo uzorak po kojem je frekvencija drugog harmonika dvostruko veća od prvog, frekvencija trećeg harmonika je trostruko veća od prvog, a isto tako je i frekvencija *n*-tog harmonika veća za *n* puta od prvog harmonika. Prema tomu, odnos između prvog i drugog harmonika prikazan je kao omjer 2:1 što predstavlja oktavu, odnos između drugog i trećeg harmonika prikazan je kao omjer 3:2 što predstavlja kvintu, odnos između trećeg i četvrtog harmonika prikazan je kao omjer 4:3 što predstavlja kvartu, a odnos između četvrtog i petog harmonika prikazan je kao omjer 5:4 što predstavlja tercu.

Kada žica titra ona titra svim frekvencijama što doprinosi boji zvuka, iako se najjače čuje osnovni harmonik.

b) Puhačka glazbala

Puhačka glazbala jesu instrumenti koji stojne valove proizvode u stupu zraka neke cijevi. Ta cijev na kraju može biti otvorena ili zatvorena. Ukoliko se radi o otvorenoj cijevi, trbusi stojnog vala nalazit će se na oba kraja pa će se harmonici odnositi kao niz cijelih brojeva. Primjer ovakvih glazbala jesu limena glazbala, npr. saksofon (Slika 15, lijevo).

Limena se glazbala najčešće sastoje od piska, putem kojeg se upuhuje zrak u instrument, i od cijevi koja je ispunjena zrakom. Ta je cijev često savijena kako bi se smanjila veličina instrumenta. Ona služi kao stup u kojoj se nalazi zrak, a vibracije tog stupa stvaraju zvuk koji čujemo. Duljina stupca u kojem titra zrak može se smanjivati i povećavati zatvaranjem odnosno otvaranjem rupa koje se na njemu nalaze. Na zvuk također može utjecati i način upuhivanja zraka kroz pisak u glazbalo. Kao i kod žičanih glazbala, odnosi između harmonika su jednaki. Slično funkcioniraju i drvena puhačka glazbala.

S druge strane, postoje puhačka glazbala kojima je jedan kraj cijevi zatvoren zbog čega se njima harmonici odnose kao neparni brojevi (Slika 16). Primjer takvih glazbala jesu orgulje (Slika 15, desno).

Iz sljedećeg izraza:

$$L = \frac{n \cdot \lambda}{4}, \tag{20}$$

možemo izlučiti λ pa se dobije izraz:

$$\lambda = \frac{4 \cdot L}{n}, \tag{21}$$

pri čemu je n uvijek neparan broj.

Općenito za n-ti harmonik vrijedi:

$$f_n = \frac{n}{4 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \tag{22}$$



Slika 15: Saksofon (lijevo) [11] i orgulje (desno) [6], kao primjeri puhačkih glazbala.



Slika 16: Harmonici puhačkih glazbala kojima je jedan kraj zatvoren. S lijeva na desno: prvi, drugi i treći harmonik. [13]

c) Udaraljke

Udaraljke čine skupinu glazbala koja se u potpunosti razlikuje od prethodne dvije skupine. Takva glazbala poznata su još pod imenom idiofoni. To su skupina samozvučnih glazbala kod kojih zvuk nastaje titranjem cijelog instrumenta, bez korištenja žica ili membrana. Ponovno ćemo zbog lakšeg razumijevanja promatrati štap.

Razlikujemo dvije vrste udaraljki – one kod kojih se na oba kraja nalaze trbusi te one kod kojih se na jednom kraju nalazi čvor, a na drugom trbuh. Kod prve skupine na obje strane štapa nalaze se trbusi zvučnog vala (oba kraja štapa su slobodna). Kao primjer može se promotriti marimba (Slika 17). Osim na krajevima, trbuh vala nalazi se još i u sredini štapa pa taj val ima tri trbuha i dva čvora (Slika 18).



Slika 17: Marimba.[7]



Slika 18: Štap s tri trbuha i dva čvora. [2]

Sljedeća veća frekvencija može se proizvesti štapom na čijem se kraju nalaze dva trbuha između kojih se nalaze tri čvora i dva trbuha, što znači da taj štap sveukupno ima četiri trbuha i tri čvora (Slika 19).



Slika 19: Štap s četiri trbuha i tri čvora. [2]

Općenito vrijedi (ako se štap zatitra na jednom kraju):

$$f_n = \frac{\pi \cdot v \cdot K}{8 \cdot L^2} \cdot m^2, \tag{23}$$

gdje v predstavlja brzinu zvuka u materijalu od kojeg je napravljen instrument, L duljinu štapa, a $m = 2 \cdot n + 1$.

Vrijedi:

$$K = \frac{debljina\ štapa}{3.46} \tag{24}$$

za pravokutne štapove, a

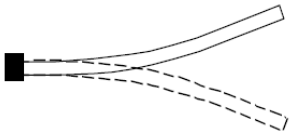
$$K = \frac{\sqrt{(unutarnji\ radijus)^2 + (vanjski\ radijus)^2}}{2} \tag{25}$$

za cijevi.

Kod druge skupine udaraljki s jedne strane štapa nalazi se čvor, a s druge trbuh. Kao primjer može se promotriti karimba, afrički instrument koji se svira palčevima (Slika 20). Modovi frekvencija za ovaj štap dani su na 21. i na 22. slici.



Slika 20: Karimba. [9]



Slika 21: Štap na čijem se jednom kraju nalazi čvor, a na drugom trbuh. On proizvodi osnovnu frekvenciju kako je ilustrirano. [2]



Slika 22: Prva viša frekvencija štapa koji ima dva čvora i dva trbuha. [2]

Općenito vrijedi (ako štap zatitramo na njegovom kraju):

$$f_n = \frac{\pi \cdot v \cdot K}{8 \cdot L^2} \cdot m^2 . \qquad (26)$$

Oznake su jednake kao u izrazu (23) osim što vrijedi $m = 2 \cdot n - 1$.

6. ZAKLJUČAK

Razumjeti glazbu uistinu je teško, a izvoditi još i teže. No proučavanjem prvenstveno valova, načina njihovog nastanka i širenja kroz prostor, djelomično se može objasniti pojam glazbe. Drugi dio može se objasniti proučavanjem zvukova. Zvukovi jesu longitudinalni valovi koji se prostorom šire kao poremećaji nekim medijem (najčešće zrakom). Povezivanjem znanja o valovima i zvukovima, glazba može postati razumljivija i jednostavnija, a sviranje pristupačnije.

7. LITERATURA

[1] Car, T., Predavanja iz fizike, Varaždin, Veleučilište u Varaždinu, 2013.

[2] Lapp, D.R., The Physics of Music and Musical Instuments, Medford, Massachusetts, Wright center for innovative science education Tufts University

[3] Planinić, J., Osnove fizike III (Valovi – akustika – optika – uvod u atomsku fiziku), Osijek, Filozofski fakultet Osijek, 2004.

[4] http://eskolaa.hfd.hr/FILMOVI/JakovLabor/jpg/stojni_val.gif

[5] http://image.4sound.dk/i/70768/roland-v-accordion-fr-1x-piano-sort-harmonika/melodica.jpg

[6] http://zupa-vitez.com/Uploads/orgulje.jpg

[7] http://www.adams-music.com/pf/images/brochure2012/Adams_Marimba_Artist-Classic_MAHC43_1024px.jpg

[8] http://www.fizika.unios.hr/~branko/of3.htm

[9] http://www.hulagift.com/media/musicals/MI-41_2.gif

[10] http://www.musicmax.hr/media/artikli/12562.jpg

[11] http://www.musicmax.hr/media/kategorije/432.jpg

[12] http://www.physicsclassroom.com/class/sound

[13] http://www.vlakci.si/media/catalog/product/cache/3/image/650x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/2/4/2488_giantxylo-01.jpg

8. ŽIVOTOPIS

Vanja Dušić rođen je 30. srpnja 1994. godine. Nakon završene Osnovne škole Vijenac u Osijeku, pohađao je III. gimnaziju u Osijeku koju je s izvrsnim uspjehom završio 2013. godine. Nakon toga, iste je godine upisao Sveučilišni preddiplomski studij Fizike na Odjelu za fiziku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku koji uspješno završava u veljači 2018. godine. Tijekom 2016. i 2017. godine pohađa te uspješno završava program za Voditelja plesnih tehnika na Pučkom otvorenom učilištu u Zagrebu. Uz to, volontira u Športsko-plesnoj udruzi Feniks u Osijeku te radi kao vanjski suradnik u HNK u Osijeku. Bavi se plesom još od 2007. godine od kada je aktivni član ŠPU Feniks s kojom sudjeluje na brojim manifestacijama, kongresima i festivalima unutar i van granica Hrvatske. Dvije akademske godine (2015./2016. i 2016./2017.) bio je član i predsjednik Studentskog zbora Odjela za fiziku te predstavnik Studentskog zbora Odjela za fiziku u Sveučilišnom zboru Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Neki od hobija su mu plesanje, putovanje, čitanje, pisanje i slušanje glazbe te je baš zbog toga odlučio napisati završni rad koji će biti vezan uz glazbu.