Računalo kao osciloskop u nastavi fizike

Sesar, Danijela

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:160:913186

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek







SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



DANIJELA SESAR

RAČUNALO KAO OSCILOSKOP U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Osijek, 2015.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



DANIJELA SESAR

RAČUNALO KAO OSCILOSKOP U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja akademskog naziva MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE

Osijek, 2015.

"**Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike – nastavnički smjer na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".**

Sadržaj

1. Uvod 8
2. Povijest osciloskopa 9
3. Osnovna građa osciloskopa 12
3.1 Katodna cijev 14
3.1.1. Otklanjanje elektronskog snopa 14
3.1.2. Elektrostatsko otklanjanje elektronskog snopa 15
3.1.3. Osjetljivost 20
3.1.4. Magnetsko otklanjanje elektronskog snopa 20
3.1.5. Naknadno ubrzanje elektrona 21
3.1.6. Zaslon katodne cijevi 21
3.1.7. Katodne cijevi s pamćenjem 22
4. Sustav za horizontalni otklon 23
4.1. Horizontalni otklonski sustav i pilasti napon 23
4.1.1. Dobivanje pilastog napona 25
4.2. Astigmatizam i sinkronizacija 26
4.3. Načini rada vremenske baze 28
5. Sustav za vertikalni otklon 31
5.1.Linija za kašnjenje 32
6. Posebne vrste osciloskopa 32
6.1. Mjerenja osciloskopom 34
7. Digitalni osciloskop 35
7.1. Metoda uzorkovanja 36
7.2. Karakteristične veličine digitalnog osciloskopa 37
8. PC (računalo) kao osciloskop 39
8.1. Zvučna kartica kao analogno digitalni pretvornik 39
8. Alati za prikaz i obradu signala 41
8.1. Winscope 41
8.2. Soundcard Oscilloscope 41
8.3. Visual Analyzer 42
10. Mjerenja pomoću Visual Analyzer-a 46
10.1. Eksperimentalni dio 47
10.1.1. Glazbeni instrumenti (osnovna frekvencija i frekvencija viših harmonika) 47

10.1.2. Zvučni udari 50
10.1.3. Akustična rezonancija 55
10.1.4. Dopplerov efekt 57
10.1.5. Ljudski glas kao instrument 61
10.2. Vježbe 65
10.2.1. Određivanje frekvencije glazbene viljuške 65
10.2.2. Određivanje frekvencije gradske mreže i oblik signala 66
10.2.3. Osciloskop i RC krug 67
11. Zaključak 68
12. Literatura 69
13. Životopis 72

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Diplomski rad
Odjel za fiziku

RAČUNALO KAO OSCILOSKOP U NASTAVI FIZIKE

DANIJELA SESAR

Sažetak

Diplomski rad s temom Računalo kao osciloskop u nastavi fizike je podijeljen u tri dijela kojeg čine analogni osciloskop, digitalni osciloskop i demonstracijske vježbe.

U prvom dijelu opisani su dijelovi analognog osciloskopa i njegov princip rada. Obuhvaćen je i povijesni pregled razvoja osciloskopa te osnovna građa osciloskopa, kao i sustav za horizontalni te vertikalni otklon.

U drugom dijelu je opisan digitalni osciloskop, računalo kao osciloskop i softver Visual Analyzer.

Zadnji dio diplomskog rada čine demonstracijske vježbe, izvedena na računalu, pomoću programa Visual Analyzer, koje se mogu primjenjivati u nastavi fizike. U svim demonstracijskim vježbama je navedena potrebna aparatura, postupak izvođenja vježbe kao i fizikalna podloga.

(72 stranice, 62 slika, 57 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: osciloskop/ demonstracijski pokusi/ nastava fizike

Mentor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Ocjenjivači: mr.sc. Slavko Petrinšak, doc.dr.sc. Marina Poje, doc.dr.sc. Denis Stanić

Rad prihvaćen:

J. J. Strossmayer University in Osijek Bachelor of Science Thesis

Department of Physics

PC AS AN OSCILLOSCOPE IN TEACHING PHYSICS

DANIJELA SESAR

Abstract

My thesis on computer oscilloscopes is divided into three main parts. The analogue oscilloscope, the digital oscilloscope and experiments.

The first part includes descriptions of the parts and work principle of the analogue oscilloscope. It also includes a overview of the history and basic structure of the analogue oscilloscope, as well as a description of systems for horizontal and vertical deflection.

In the next part I describe the digital oscilloscope, PC oscilloscope and the software Visual Analyzer.

The last part of my thesis contains experiments, used in teaching physics, performed on a PC oscilloscope. In all of the presented experiments there is a description of the necessary equipment, the way in which they were performed and the foundation each experiment has in physics.

(72 pages, 62 figures, 57 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: oscilloscope/ demonstration experiments/ instruction physics

Supervisor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Reviewers: mr.sc. Slavko Petrinšak, doc.dr.sc. Marina Poje, doc.dr.sc. Denis Stanić

Thesis accepted:

1. Uvod

Osciloskopi su uređaji koji su osim svoje rasprostranjenosti u istraživačkim i razvojnim laboratorijima, svoju primjenu našli i u brojim drugim granama djelatnosti, poput servisnih radionica i medicine, u kojoj služe za prikazivanje bioloških napona (EEG ili EKG). Koriste se za prikaz i određivanje parametara vremenski ovisnih (naponskih) signala. Brojnih su mogućnosti, te je tako uz primjenu odgovarajućih strujnih sondi, odnosno odgovarajućih senzora moguće prikazivanje i neelektričnih signala (npr.zvuka ili vibracija).

Razvojem tehnologije tijekom godina, digitalni mjerni uređaji su iz uporabe počeli izbacivati analogne. Točnije, sve do sredine 20. stoljeća za mjerenje veličina, kako električnih tako i neelektričnih, rabili su se samo analogni uređaji, koji su tada i doživjeli svoj vrhunac. Zbog potrebe za preciznijim mjernim uređajima razvijeni su oni kod kojih se analogna veličina pretvarala u digitalni zapis nazvani digitalni mjerni uređaji.

Čovjekov mozak prilagođen je analognom prikazu. Praktična primjena pokazala je da, u sustavima gdje je potrebno istodobno pratiti pokazivanje triju ili više instrumenata te u skladu s njihovim pokazivanjima obavljati neke radnje (npr.uključivati ili isključivati strujne krugove kod određenih iznosa mjerene veličine), valja rabiti instrumente s analognim prikaznicima.

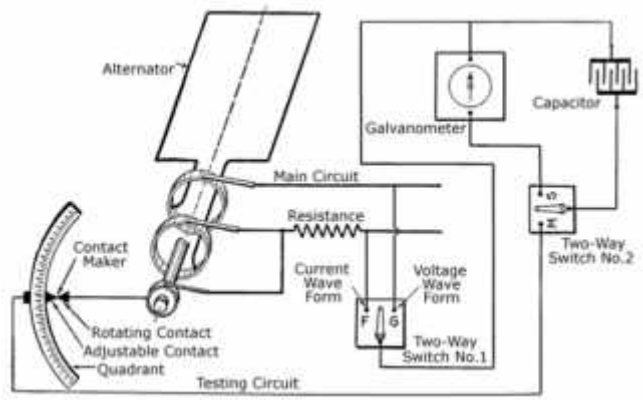
Neke od prednosti digitalnih osciloskopa nad analognim su laki prijenos rezultata mjerenja na računalo, te time i njigova daljnja obrada, korištenje monitora na bazi tekućih kristala čime se smanjuje težina i dimenzija osciloskopa itd.

2. Povijest osciloskopa

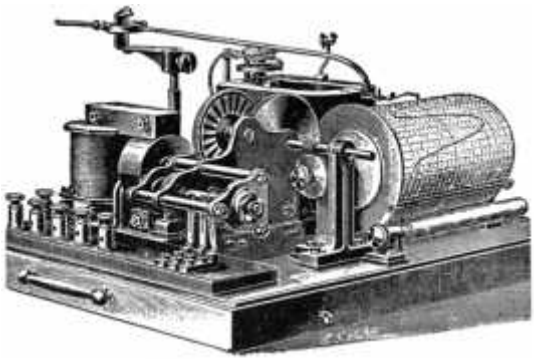
Osciloskopi su instrumenti koji služe za prikaz vremenski ovisnih signala. Obično na *y*-osi prikazuju amplitudu signala (napon), dok na *x*-osi prikazuju vrijeme. Osciloskopi su korisni za promatranje napona u električnim krugovima ili npr. u srcima. Povijesni razvoj osciloskopa je usmjeren na automatizaciju, brzinu i koherentnost oslikavanja napona.

1. Oscilogram i oscilograf

   Oscilogram (ručno crtanje) u usporedbi s očitavanjem galvanometra je bio najstariji način za prikazivanje električnih valnih oblika. 1880. godine Jules Francois Joubert je izumio „point-to-point“ stroboskopsku kontaktnu metodu koja je omogućavala mehanizmima, kao što je Hospitalier Ondograph, da djelomično automatiziraju proces. Ponekad su se te djelomično automatizirane slike nazivale oscilografi.



Slika 1: Ilustracija Joubertove „point to point“ stroboskopske kontaktne metode. [5]

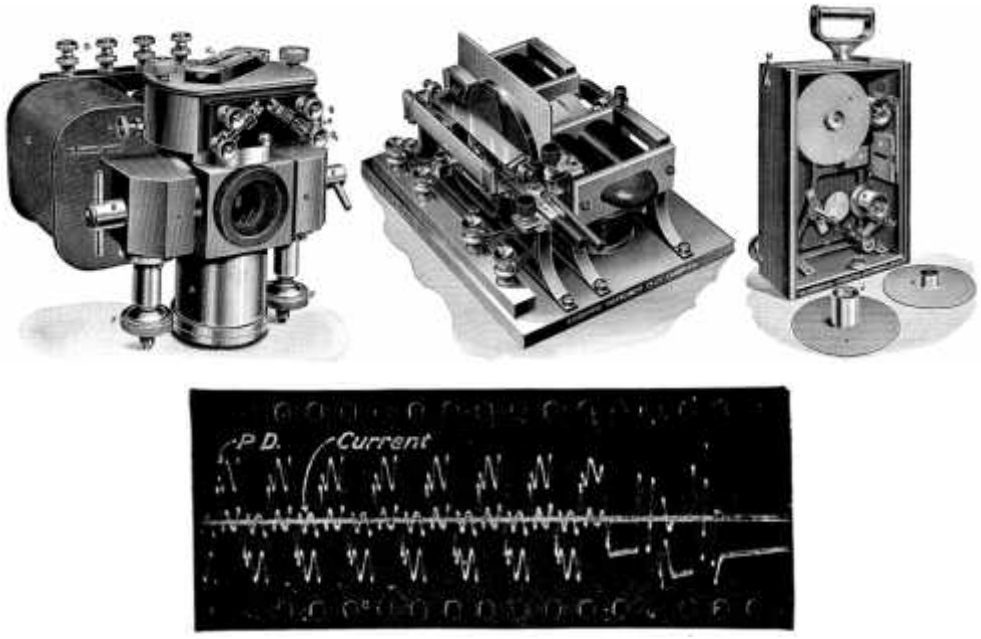


Slika 2: Hospitalier Ondograph. [5]

2. Zrcalni galvanometri

   1826.godine, Johann Poggendorff je izumio zrcalni galvanometar, poznat i kao elektrodinamički mjerač, uređaj kojega je, u svojim djelima, popularizirao Lord

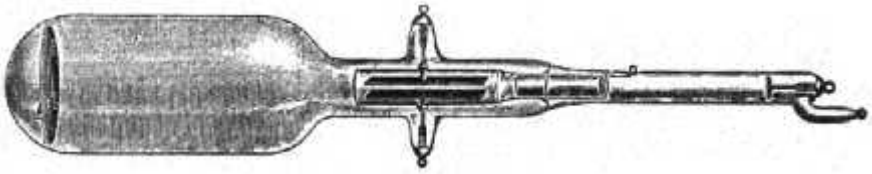
Kelvin. Kako bi se omogućilo izravno mjerenje valnih oblika, uređaji za snimanje su trebali koristiti male mase kako bi se sustav mjerenja mogao gibati dovoljnom brzinom da odgovara gibanju stvarnih valova koji se mjere. Ovo je postignuto razvojem oscilografa s pomičnim svitkom. Razvio ga je William Duddell, a u moderno doba se taj oscilograf naziva još i zrcalni galvanometar.



Slika 3: Duddellov pokretni namotaj; rotirajući okidač i pokretno zrcalo; pokretna kamera. Filmski zapis iskrenja preko prekidača kontakta, kada je isključen strujni krug visokog napona. [5]

3. Katodne cijevi

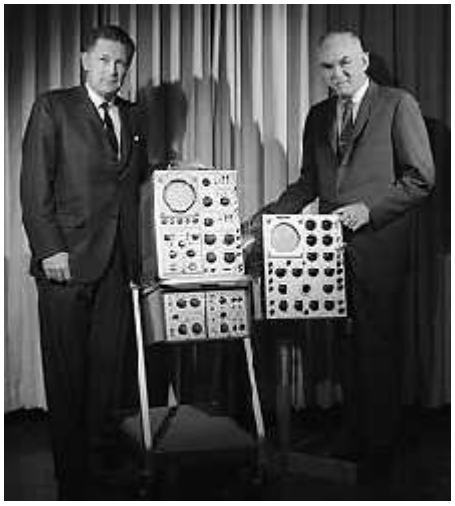
Iako su oscilogrami, oscilografi i zrcalni galvanometri bili važan pomak prema učinkovitom vizualnom prikazu napona, sve tri tehnike su napon prikazivale presporo. Izumitelji su, tražeći brže tehnologije, eksperimentirali s mlazovima žive, vrućim žicama i s još mnogo toga. Katodne cijevi, predložene od strane Alberta Hess-a i Ferdinanda Braun-a, su učinile korak naprijed. Uspoređujući s ranijom opremom, katodne cijevi su omogućavale bolju i učinkovitiju sliku napona. Te katodne cijevi se nazivaju hladnima, jer nisu električki zagrijavane od strane žarne niti. Međutim, tek 1920.-ih godina su osciloskopi s katodnim cijevima postali praktični i široko rasprostranjeni.



Slika 4: Braun-ova hladna katodna cijev (1897.). [42]

4. CRT osciloskopi (osciloskop s katodnim cijevima)

Tijekom 20. stoljeća nastaje nekoliko vrsta osciloskopa. Na primjer, neke cijevi koriste dvije zrake istovremeno kako bi prikazale sliku različitih napona; drugi osciloskopi dopuštaju promatračima da prebacuju pojedinu zraku između dva različita naponska signala. CRT osciloskopi su konstantno bili unaprijeđivani. 1946.godine, Howard Vollum i Jack Murdock su riješili problem prikazivanja ponavljajućih valnih oblika na stacionaran i čitljiv način, tako što su izumili aktivni osciloskop, koji je iskoristio prednosti fosforskog zaslona. U to vrijeme, Tektronix je bio vodeći proizvođač CRT osciloskopa.



Slika 5: Vollum i Murdock, osciloskop nazvan 511. [43]

5. Digitalni osciloskopi

1985.godine, tvrtka Leroy je predstavila prvi digitalni osciloskop, kompjutoriziranu verziju analognog stroja. Digitalni osciloskop u 21.stoljeću koristi digitalnu memoriju i složene digitalne tehnologije za obradu signala koji vizualno predstavljaju napone, na sofisticiran način. Softver za osciloskop je sada pristupačan za svakodnevnu upotrebu na kućnim računalima, a pokušaji daljnjih inovacija su usredotočeni na bežične mreže.

3. Osnovna građa osciloskopa

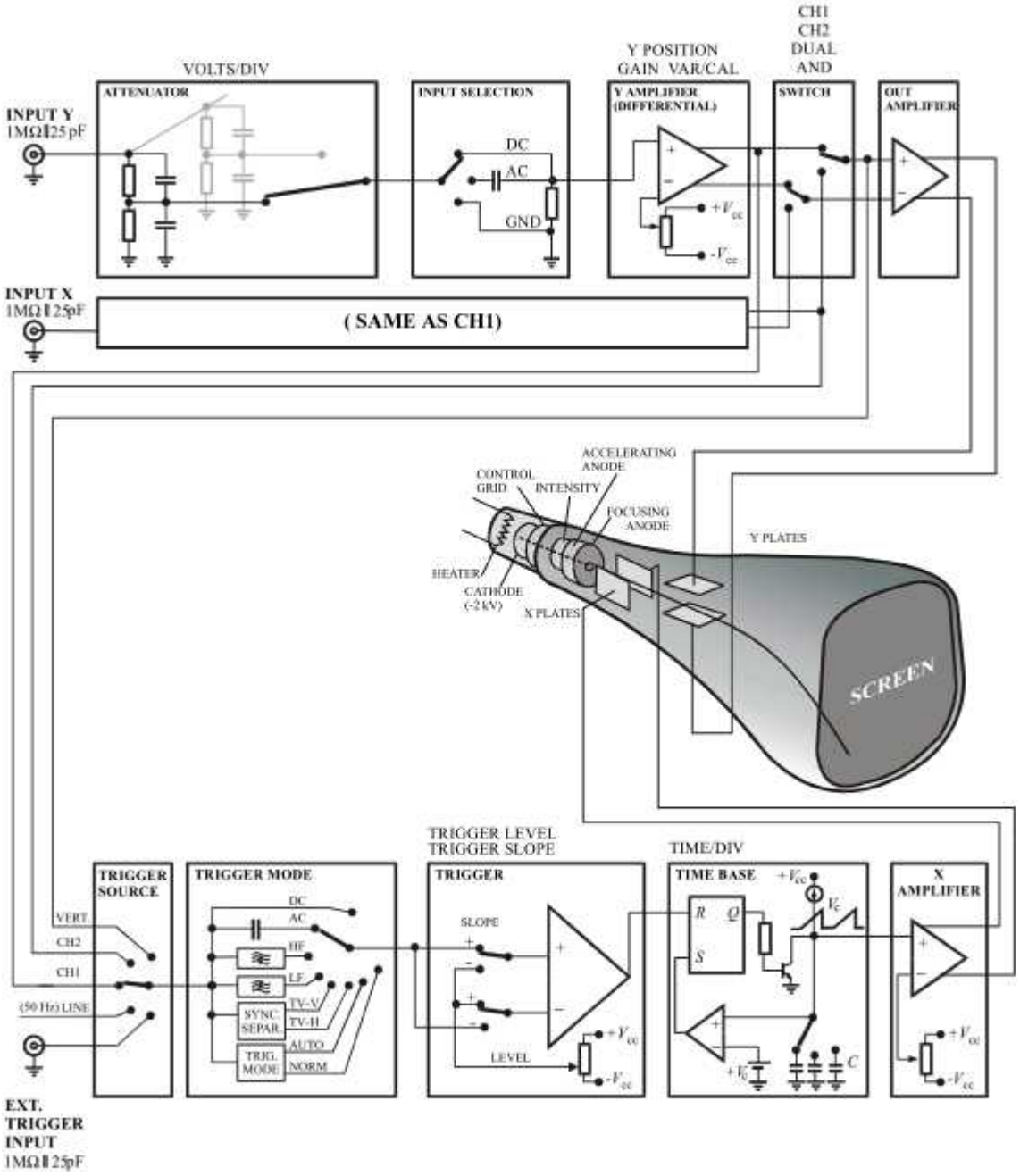
Osciloskop je uređaj širokog spektra mogućnosti, te se njime može mjeriti napon (AC/DC), jakost električne struje, valni oblici, vremenski intervali, periodi, frekvencije, fazne razlike, omjeri frekvencija (Lissajoussove krivulje – prikazuju stazu gibanja čestice koja istovremeno izvodi dva međusobno okomita harmonička titranja oko iste točke).

Osciloskop je uređaj velikog unutarnjeg otpora pa se u strujni krug spaja paralelno, te time ne utječe na prolazak struje kroz dani element, odnosno ona je gotovo jednaka kao i prije uključivanja osciloskopa. Drugim riječima, odnosi struja i napona u strujnom krugu se ne mijenjaju.

Sliku na osciloskopu iscrtava tanak snop brzih elektrona koji udara na fluorescentni zaslon katodne cijevi. Snop se otklanja djelovanjem električnih ili magnetskih polja i slijedi njihove promjene sve do vrlo visokih frekvencija bez vremenskog zaostajanja, odnosno slijedi trenutne vrijednosti mjerene veličine koja je prouzrokovala ta električna ili magnetska polja. Time je omogućeno snimanje pojava čija je frekvencija čak i preko 100 MHz. [1] Otklanjanje elektrona ovisi o načinu na koji priključujemo napon, tj. priključujemo li ga na tzv. *y*- pločicu, *x*-pločicu ili oba para pločica (kondenzator) između kojih prolaze elektroni. U prvom slučaju, kada napon priključujemo na *y*-pločicu, elektroni će se otklanjati gore dolje (*y* os); u slučaju *x*-pločice, elektroni će se otklanjati lijevo desno (os *x*). Takav napon se naziva pilasti i kod njega je karakteristično što se elektroni polagano otklanjaju u desnu stranu, a brzo se vraćaju u početni položaj. To je posljedica okidne vremenske baze. U zadnjem slučaju, kada napon spajamo na oba para pločica, dobivamo sliku valnog oblika napona, odnosno vremenske promjene. Uvjet za ovakvo spajanje napona jest da oba napona moraju međusobno biti usklađena, tj. moraju imati isti početak.

Osnovni dijelovi osciloskopa jesu:

- Katodna cijev
- Vertikalno pojačalo
- Linija za kašnjenje
- Generator pilastog napona
- Horizontalno pojačalo
- Sklop za okidanje
- Izvor visokog i niskog napona



X PLATES - PLOČICE ZA HORIZONTALNI OTKLON
Y PLATES - PLOČICE ZA VERTIKALNI OTKLON
HEATER - GREJAČ KATODE
CATHODE - KATODA
ACCELERATING ANODE - UBRZAVAJUĆA ANODA
FOCUSING ANODE - FOKUSIRAJUĆA ANODA
SCREEN - EKRAN
ATTENUATOR - ATENUATOR (OSLABLJIVAČ)
Y POSITION - Y POZICIJA

SAME AS CH1 - ISTO KAO KANAL 1
INPUT SELECTION - IZBOR ULAZA
GAIN VAR/CAL - POJAČANJE PROMENLJIVO/KALIBRISANO
OUT AMPLIFIER - IZLAZNI POJAČAVAČ
INPUT X - ULAZ X
TRIGGER LEVEL - NIVO OKIDANJA
TRIGGER SLOPE - NAGIB OKIDANJA

TIME BASE - VREMENSKA BAZA
TIME/DIV - VREME/PODEOK
INPUT X - ULAZ X
TRIGGER MODE - NAČIN OKIDANJA
EXT. TRIGG. INPUT - EKSTERNI OKIDNI ULAZ
EXT. - VANJSKI
TRIGGER SOURCE - IZVOR OKIDANJA
CONTROL GRID - UPRAVLJAČKA REŠETKA

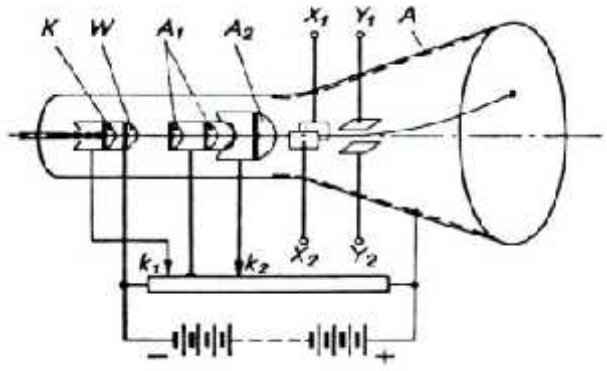
Slika 6: Principijelna shema osciloskopa. [15]

3.1 Katodna cijev

Osnovi dio svakog osciloskopa jest katodna cijev. Snop elektrona koji se otklanja, najčešće to čini pod utjecajem električnog polja, čime se postiže velika brzina pisanja, velika ulazna impedancija te linearnost odnosa između otklona snopa i napona koje stvara električno polje. Kod sustava s magnetskim otklonom, na fluorescentnom zaslonu se stvara manje svijetla mrlja, potrebna je kraća katodna cijev, ulazna impedancija je mala pa je to jedan od razloga zašto se rjeđe upotrebljavaju u mjernim svrhama.

Elementi katodne cijevi su:

a) Neizravno grijana katoda (stvara slobodne elektrone)
b) Elektronska optika (fokusira snop elektrona na zaslon; omogućuje oštru sliku)
c) Sustav za otklanjanje elektronskog snopa
d) Zaslon (snop elektrona pada na njega i kinetičku energiju pretvara u svjetlosnu)



Slika 7: Katodna cijev. [7]

3.1.1. Otklanjanje elektronskog snopa

Visoko vakuumirani stakleni balon, unutar kojega je tlak manji od 10^{-6} mm Hg, je na početku cilindričan, a dalje se širi te na završetku ima blago izbočeno dno koje je premazano fluorescentnim slojem. Najdublje u balonu se nalazi katoda čija je svrha da zagrijava nit i emitira uzak snop elektrona, kružnog presjeka, što je posljedica emisijskog sloja katode postavljenog u okruglom udubljenju katodne površine isijavanja. Prije su se katode izrađivale od volframa, no zbog potrebne niže temperature za izbijanje elektrona, danas se koriste katode izrađene od metalnih oksida. Iza nje, nalazi se Wehneltov cilindar (naziv je dobio radi cilindrična oblika) koji ima kuglasti otvor u sredini. Na negativnom je potencijalu katode,

između -20 i -40 V, a zadatak mu je prisiliti elektrone da se skupljaju oko osi cijevi. Osim toga, kao glavni zadatak Wehneltovog cilindra, se javlja promjena potencijala prema katodi, čime se mijenja broj elektrona snopa, što direktno utječe na svjetlinu mrlje koja se javlja na fluorescentnom zaslonu. Ukoliko se postigne dovoljno velik negativni potencijal, sprječava se prolaz elektrona kroz otvor Wehneltova cilindra, te se ne pojavljuje svijetla mrlja na fluorescentnom zaslonu.

Idući dio katodne cijevi čine anode koji imaju oblik šupljeg metalnog valjka i nalaze se na visokom potencijalu, a čije uloge su da privlače elektrone i prisiljavaju ih da se kreću velikom brzinom prema zaslonu katode te fokusiranje elektronskog snopa. Nakon prolaska elektronskog snopa kroz otvor na dijafragmi anode, sprječava se širenje elektronskog snopa pomoću oblikovanja električnog polja kroz koje prolaze elektroni. Prijelazom iz jedne u drugu ekvipotencijalnu plohu, koje se mogu formirati oblikom anoda te njihovom potencijalnom razlikom na način da se na zaslonu upravo dobije fokus elektronskog snopa, dolazi do loma elektronskog snopa. Razlika potencijala između anoda se može mijenjati koristeći se klizačem.

Nakon što elektroni dođu na fluorescentni zaslon, na njemu dolazi do sekundarne emisije elektrona, tj. elektrona iz površine koja je bombardirana elektronima velikih brzina. Ti elektroni se skupljaju na grafitnom sloju na unutrašnjosti cijevi koji je povezan s elektrodom koja služi za naknadno ubrzavanje elektrona nakon što isti prođu kroz otklonske pločice, što rezultira većom svjetlinom slike.

3.1.2. Elektrostatsko otklanjanje elektronskog snopa

Između zaslona katodne cijevi i anoda nalaze se još dva para elektroda, paralelnih pločica koje su namještene tako da elektronski snop prolazi između oba para pločica. Jedan par pločica je smješten okomito na drugi, odnosno onaj par koji je smješten vodoravno uzrokuje otklon snopa u okomitom smjeru, a onaj par koji je smješten okomito uzrokuje otklon elektronskog snopa u vodoravnom smjeru. Ako na vodoravne otklonske pločice dovedemo istosmjerni napon, svijetla mrlja pomakne se iz središta u okomitom smjeru za udaljenost koja je razmjerna narinutom istosmjernom naponu. Ako se pak na te pločice dovede izmjenični napon, na zaslonu se pokaže okomita svijetla crta čija je dužina razmjerna dvostrukoj amplitudi narinutog izmjeničnog napona. [2] Ukoliko među otklonskim pločicama

nema potencijala, elektronski snop će udarati u sredinu zaslona. Silu koja djeluje na elektron elementarnog naboja e_0 i mase m_0 možemo izračunati na sljedeći način:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \qquad (1.1)$$

Koristeći drugi Newtonov zakon dobivamo:

$$m\vec{a} = q \cdot \vec{E} \rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E} \qquad (1.2.)$$

Promatramo česticu u elektrostatskom polju koje je određeno gradijentom električnog potencijala U (usmjereno je od točaka većeg ka točkama manjeg potencijal, tj. u smjeru negativne derivacije potencijala) [53]

$$\vec{E} = -g \qquad (x, y, z) = -(\frac{\partial}{\partial}\vec{\imath} + \frac{\partial}{\partial}\vec{\jmath} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}) \qquad (1.3)$$

Ukoliko polje gledamo kao konzervativno, onda će zbroj energija u vremenskom trenutku t_1 biti jednak zbroju energija u vremenskom trenutku t_2, odnosno slijedi:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + qU_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + qU_2 \qquad (1.4)$$

Iz gornje jednadžbe, dobivamo izraz za krajnju brzinu, v_2.

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = -q(U_2 - U_1) + \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad (1.5)$$

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - \frac{2q}{m}(U_2 - U_1)} \qquad (1.6)$$

Ako za početne uvjete $(t_1 = 0)$ stavimo: $v_1 = 0 \; i \; U_2 = 0$, krajnja brzina će biti dana izrazom: $v_2 = \sqrt{-2\frac{q}{m}U_1}$ (1.7)

U situaciji kada elektron pokrećemo iz stanja mirovanja, vrijediti će:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = -qU_1 \qquad (1.8)$$

Električno polje je usmjereno od točaka većeg potencijala (anoda) prema točkama manjeg potencijala (katoda), i opisujemo ga izrazom:

$$\vec{E} = E_y \cdot \vec{\jmath};\; y = -\frac{\partial}{\partial} = -\frac{U_a}{d} \qquad (1.9)$$

Gdje je U_a napon izvora koji omogućava stvaranje elektičnog polja između pločastih elektroda, a d udaljenost između elektroda.

Ako je u trenutku *t=0* elektron emitiran iz katode čiji je potencijal uzet kao referentan, tj.jednak nuli, s brzinom v_k u smjeru električnog polja, za jednadžbu gibanja imamo:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} \quad / \int \qquad (1.10)$$

$$\frac{dy}{dt} = v = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} t + C_1 \qquad (1.11)$$

U trenutku $t = 0$, početna brzina $v = v_k$, slijedi $C_1 = v_k$, pa će brzina elektrona biti dana kao:

$$\frac{dy}{dt} = v = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} t + v_k \qquad (1.12)$$

$$y = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} \frac{t^2}{2} + v_k t \qquad (1.13)$$

Gornji izraz predstavlja položaj elektrona u trenutku *t*, a dobili smo ga integriranjem prethodnog izraza, uz $C_2 = 0$. Konstanta iščezava jer se u trenutku $t = 0$ elektron nalazi na katodi gdje je $y = 0$.

Ako pak uzmemo da je $v_k = 0$, jednadžbe gibanja će glasiti:

$$v = \frac{dy}{dt} = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} t \quad (1.14)$$

$$y = -\frac{q_0}{m_0} \cdot \frac{U_a}{d} \frac{t^2}{2} \qquad (1.15)$$

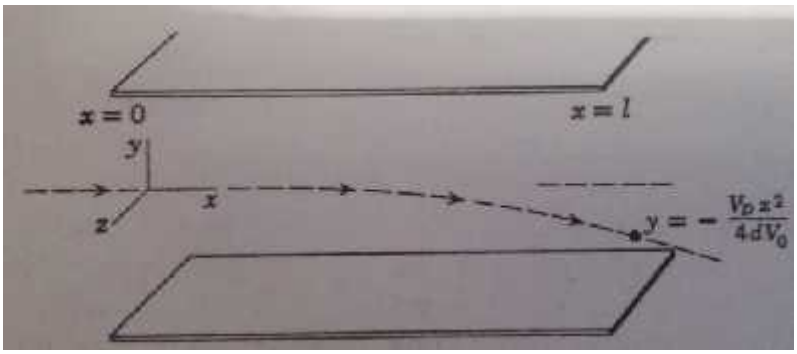
Kombiniranjem ta dva izraza dobivamo izraz za brzinu koji je neovisan o vremenu, a ovisan o potencijalu unutar ploča:

$$v = \sqrt{-\frac{2q_0}{m_0} U(y)} \qquad (1.16)$$

Gdje je *U(y)* potencijal na koordinati *y* unutar ploča, a u slučaju homogenog polja dan je kao:

$$U(y) = \frac{U_a}{d} y \quad (1.17)$$

U slučaju dosada opisanom trajektorija je pravac. Ukoliko je početna brzina proizvoljno orijentirana, trajektorija elektrona će biti parabola.



Slika 8: Parabolična trajektorija između ploča.[54]

Ako elektron uđe u električno polje s brzinom $\overrightarrow{v_u} = v_u\vec{\imath}$, a smjer kretanja elektrona je okomit na električno polje paralelno osi *y*, jednadžba gibanja će biti određena na sljedeći način (slika 8):

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_y} = (-E)\vec{\jmath};\ \left|\vec{E}\right| = E = k \quad . \qquad (1.18)$$

$$\vec{E} = -g \qquad = -\frac{\partial}{\partial}\vec{\jmath} \qquad (1.19)$$

Derivacijom *x*, *y* i *z* komponente dobijemo slijedeće vrijednosti:

$$x = v_u t \qquad (1.20)$$

$$y = \frac{-q_e}{m_{e0}} E \frac{t^2}{2} \quad (1.21)$$

$$z = 0 \quad (1.22)$$

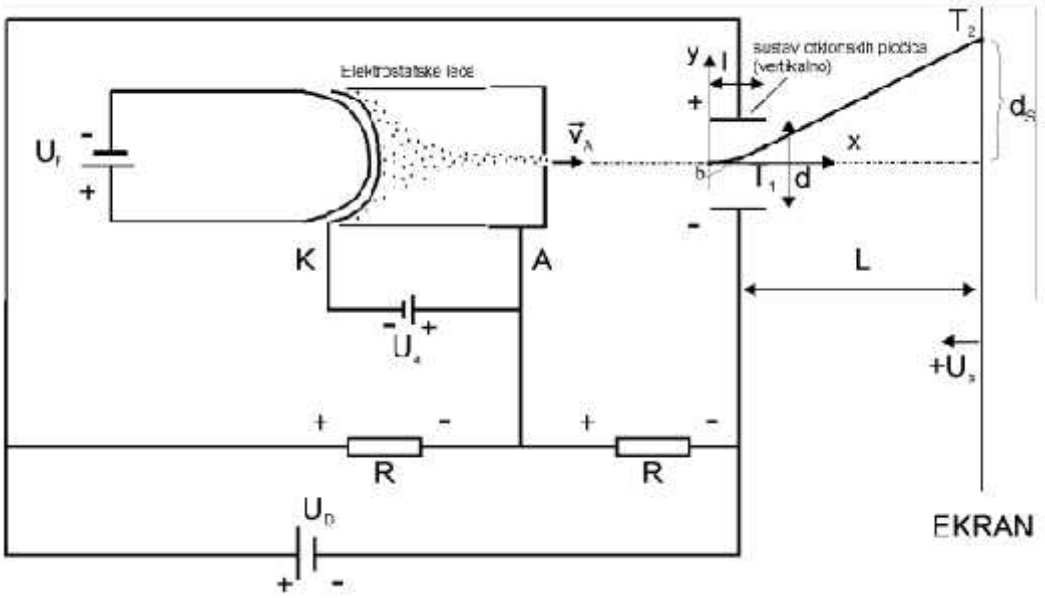
Rješavanjem sustava (vrijednosti za *x* i *y* komponentu) slijedi:

$$t = \frac{x}{v_u} \rightarrow y = \frac{-q_e}{m_{e0}} E \frac{1}{2v_u^2} x^2 \ (\ p \qquad o \qquad p \qquad d \qquad)\ (1.23)$$

Izlaskom iz polja, elektron se giba po paraboli, a dalje tangencijalnom brzinom $\overrightarrow{v_2}$ po pravcu.

Promjenom napona između otklonskih pločica mijenjamo i veličinu otklona elektrona. Električno polje između tih pločica je promjenjivo u vremenu, no ako su zadovoljeni određeni uvjeti aproksimativno možemo uzeti da se elektron giba u elektrostatskom polju. [53]

Osim dosada određenog, možemo izračunati i vrijednost apsolutnog vertikalnog otklona.



Slika 9: Otklon elektronskog snopa. [53]

Odredimo točke T_1 i T_2. Iz izraza (1.16) i (1.23) proizlazi:

$$y = \frac{-q_e}{m_{e\mathbb{C}}} \frac{U_D}{2dv_a^2} x^2$$

$$v_a = \sqrt{2\frac{-q_e}{m_{e\mathbb{C}}} U_a}$$

$$\square\ y = \frac{U_D}{4dU_a} x^2 \qquad (1.24)$$

Gdje je U_D izvor napajanja otklonskih pločica, odnosno napon kojim otklanjamo elektrone, dok je U_a napon kojim ubrzavamo elektrone.

Koordinate točaka: $T_1(l, y_1) i\ T_2(L + \frac{l}{2}, d_s)$

$$y_1 = \frac{U_D}{4dU_a} l^2;\ y_1' = \frac{U_D l}{2dU_a} \qquad \text{koeficijent u smjeru } T_1 \ (1.25)$$

Tangenta $y_t = y_1' x + b$

$$\frac{U_D l^2}{4dU_a} = \frac{U_D l}{2dU_a} l + b\ \square\ b = -\frac{U_D l^2}{4dU_a}\ \square\ y_t = \frac{U_D l}{2dU_a} x - \frac{U_D l^2}{4dU_a} \qquad (1.26)$$

Kako je i točka T_2 na tangenti, njezine koordinate uvrstimo u jednadžbu:

$$d_s = \frac{U_D l}{2dU_a}\left(L + \frac{l}{2}\right) - \frac{U_D l^2}{4dU_a} \qquad (1.27)$$

Apsolutna vrijednost vertikalnog otklona se računa iz izraza:

$$d_S = \frac{U_D l}{2 d U_u} \qquad (1.28)$$

Kao što vidimo iz prethodnog izraza, otklon će biti veći što je otklonski napon veći, dužina pločica i njihova udaljenost od zastora veća, a napon ubrzanja i razmak pločica manji.

3.1.3. Osjetljivost

Osjetljivost katodne cijevi se definira kao omjer otklona i otklonskog napona na način:

$$S_i = \frac{y}{U} = \frac{l}{2 d U_A} \qquad (1.29)$$

Osjetljivost nam kazuje koliki je otklon za neki fiksirani otklonski napon *U*, tako da će osjetljivija cijev za isti otklonski napon imati veći otklon.

3.1.4. Magnetsko otklanjanje elektronskog snopa

Magnetsko otklanjanje elektronskog snopa se provodi pomoću zavojnica čija polja djeluju okomito na elektronski snop. Obično je zavojnica podijeljena na dvije dijela spojena u seriju i postavlja se na obje strane cijevi. Ako s *B* označimo magnetsku indukciju proizvedenu u tim zavojnicama, s *x* smjer elektrona, v_x brzinu elektrona u smjeru *x*, na elektron će djelovati sila $F = B v_x e_0$, te će on dobiti akceleraciju okomito na os *x* danu izrazom:

$$a_y = \frac{F}{m_0} = \frac{B \cdot v_x \cdot e_0}{m_0} \qquad (1.30)$$

Brzina u smjer osi *y* se računa prema sljedećem izrazu:

$$v_y = a_y t = \frac{B \cdot v_x \cdot e_0}{m_0} \cdot \frac{l}{v_x} = \frac{B \cdot l \cdot e_0}{m_0} \qquad (1.31)$$

Iz prethodnog izraza se vidi kako brzina ovisi o *t* – vremenu zadržavanje elektrona u magnetskom polju, odnosno v_x – brzini elektrona u smjeru osi *x* i dužini *l* na koju djeluje magnetsko polje.

Otklon na zaslonu:

$$y = v_y \frac{L}{v_x} = \frac{B \cdot l \cdot L}{\sqrt{2 \cdot U_a \cdot m_0 \cdot l \cdot e_0}} \qquad (1.32)$$

Zaključak je kako je pri magnetskom otklanjaju elektronskog snopa otklon obrnuto proporcionalan drugom korijenu anodnog napona, dok je kod elektrostatskog otklanjanja on obrnuto proporcionalan anodnom naponu.

3.1.5. Naknadno ubrzanje elektrona

Do poteškoća dolazi kada se žele snimati pojave velikih brzina koje se ne ponavljaju, jer je za takvo snimanje potreban veliki intenzitet svijetle mrlje, što pak zahtijeva povećanje snage elektronskog snopa. Ukoliko se snaga povećava na račun struje, otežava se fokusiranje i gubi se na oštrini slike, a smanjena osjetljivost je također i rezultat povećanja anodnog napona, pa se kao rješenje uzima anoda za naknadno ubrzavanje elektrona. Nanosi se u obliku vodljivog sloja na konusni dio katodne cijevi čime se stvara električno polje koje naknadno ubrzava elektrone i malo smanjuje osjetljivost. Promatranje pojava koje se ne ponavljaju i snimanje istih, pri tome da te pojave traju manje od 0,1 μ , omogućeno je tako što se na anodu za naknadno ubrzanje dovodi pozitivni napon koji može biti i nekoliko puta veći od napona između katode i anode, čak 20 kV.

3.1.6. Zaslon katodne cijevi

Fluorescentni zaslon katodne cijevi je prozirna površina premazana fluorescentnim tvarima koje svijetle i stvaraju slike ovisno o tome koliko ih je elektrona pogodilo, a broj elektrona koji pada na pojedino mjesto na zaslonu u svakom trenutku ovisi o naponu na upravljačkoj rešetki. [8] Kao premazi se najčešće koriste kalijev volfram, cinkov sulfid, cinkov ortosilikat itd., i nanose se na unutrašnju stranu dna cijevi te taj sloj nanešenog materijala omogućuje pretvorbu kinetičke energije elektrona u svjetlost.

Osnovna svojstva koja imaju zasloni, odnosno osnovna svojstva materijala su:

a) Persistencija – vrijeme potrebno da svjetlina mrlje na zastoru padne na ništicu. Ovo svojstvo zaslon posjeduje jer i nakon uzbuđivanja mora emitirati elektrone neko određeno vrijeme. Ono može biti kraće, ukoliko se slika mijenja pri promatranju, pa

imamo manju persistenciju kako bi slika bila pregledna (periodične pojave velikih frekvencija), ili duže vrijeme, kod npr. prijelaznih pojava koje se ne ponavljaju, kada imamo veću persistenciju (niže frekvencije).

b) Fluorescencija – isijavanje svjetlosti pri udaru elektrona
   - vrlo nestabilni elektroni („brz povratak“)
   - intenzivna svjetlost
c) Fosforscencija – isijavanje svjetlosti nakon udara elektrona
   - stabilniji elektroni („spor povratak“)
   -slabiji intenzitet svjetlosti, no duže trajanje

3.1.7. Katodne cijevi s pamćenjem

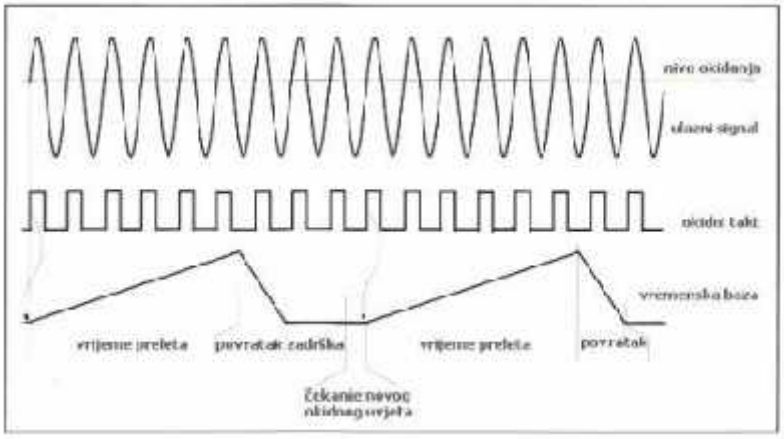
Osim prethodno opisane katodne cijevi, postoji još nekoliko vrsta istih, kao npr. katodne cijevi s pamćenjem, katodne cijevi s dva elektronska snopa, katodne cijevi u kojima elektronski snop otklanja magnetsko polje itd.

Katodne cijevi s pamćenjem su one koje mogu gotovo trajno zadržati sliku na zaslonu. Razlikuju se one katodne cijevi koje mogu sliku zadržati na zaslonu i one koje to čine na mrežici. Ova mogućnost je rezultat primjene materijala koji, bombardirani snopom elektrona u određenim uvjetima, emitiraju više elektrona nego što su ih bombardiranjem primili. Zbog nemogućnosti mijenjanja intenziteta svjetla zapisa, katodne cijevi s pamćenjem na zaslonu se rijetko koriste u praksi.

4. Sustav za horizontalni otklon

4.1. Horizontalni otklonski sustav i pilasti napon

Na osciloskopu se najčešće promatraju veličine koje se mijenjaju s vremenom, te stoga horizontalni otklonski sustav mora biti razmjeran vremenu, a sustav koji ga kontrolira se naziva vremenska baza. U osciloskopu postoji generator za prebrisavanje (sweep generator) kojemu je zadaća da precizno iscrtava elektronski snop preko zaslona nekom brzinom koju je odabrao korisnik.

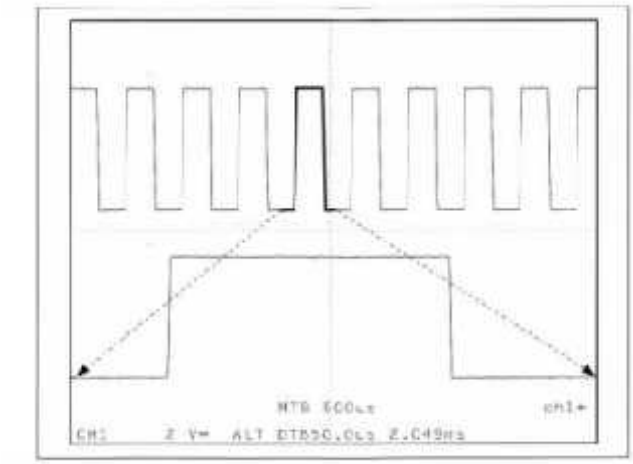


Slika 10: Izlaz generatora vremenske baze. [10]

Najčešće je brzina iscrtavanja između 20 ns/pod do 0,5 s/pod, s podešavanjem vremenske baze u koracima 1-2-5, koja se može postaviti i na različite vrijednosti od standardnih čime se omogućuje prikaz cijelog perioda nekog valnog oblika preko cijelog zaslona. Moderniji osciloskopi mogu raditi u kontinuiranom kalibriranom varijabilnom modu što omogućuje bolju vremensku razlučivost mjerenja te smanjuje mogućnost pogreške. Uobičajeno okidanje vremenske baze kod složenih video signala neće dati dobre rezultate te zbog toga moderniji osciloskopi koriste dvije vremenske baze:

a) Glavna vremenska baza (MTB) – može biti okidana glavnim okidnim događajem unutar valnog oblika, a dio traga ove baze se prikazuje svjetlije, intenzivnije
b) Usporena vremenska baza (DTB) – započinje na početku intenziviranog dijela, može se postaviti na vlastitu brzinu prebrisavanja

Kod osciloskopa s dvije vremenske baze, elektronski snop naizmjenično prebriše zaslon s dvije različite brzine prebrisavanja.

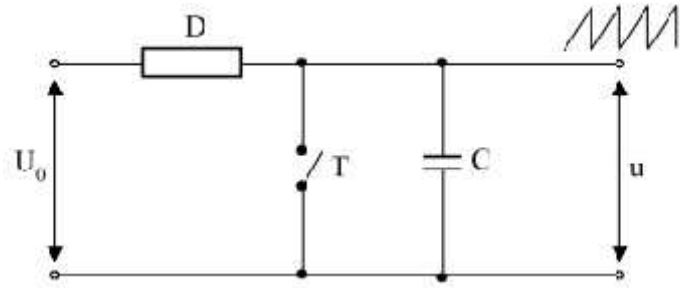


Slika 11: Signal prikazan s dvije vremenske baze. [10]

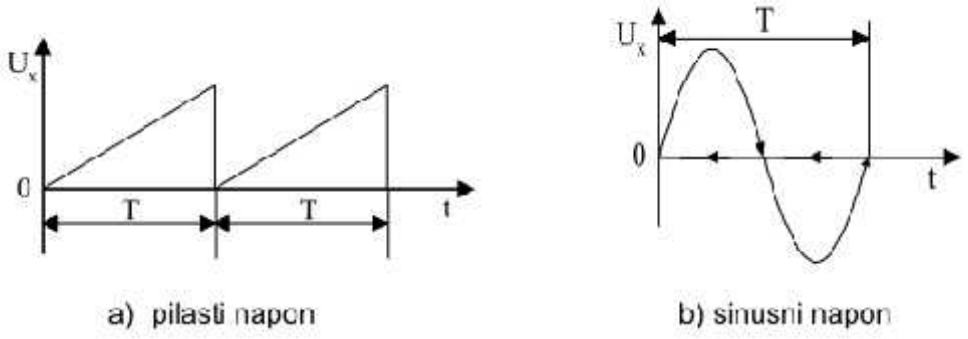
Načini rada osciloskopa s dvije vremenske baze:

1. MTB – aktivna samo glavna vremenska baza
2. MTBI – intenzivirana glavna vremenska baza, prikazuje prebrisavanje samo MTB, prikazana početna pozicija za DTB
3. DTB – usporena vremenska baza, prikazano samo DTB prebrisavanje
4. MTBI i DTB – isti princip kao i kod MTBI, prikazuje prebrisavanje DTB

U skladu s vremenski promjenjivim promatranim veličinama, elektronskom snopu je dana neka stalna brzina u horizontalnom smjeru, i potrebno je da se snop što je moguće prije vrati s desne strane na lijevu kako bi nastavio, tj. ponovno počeo s crtanjem po zaslonu. Mjereni napon se dovodi na jedan par metalnih pločica (vertikalni), a na drugi par metalnih pločica (horizontalni) treba dovesti onoliko napona koliko će snopu dati jednoliku brzinu gibanja. Tom uvjetu odgovara generator pilastog napona čiji napon raste linearno i periodički nakon nekog vremena pada od najveće vrijednosti na početnu vrijednost. Princip je sljedeći: tokom rasta napona na pločicama, snop putuje od lijevog ruba zaslona prema desnom, i u trenutku kada postigne punu visinu, elektronski snop je dospio na desni rub zaslona, te se tada pilasti napon mora brzo smanjiti, odnosno pasti na ništicu kako bi snop mogao što brže doći u početni položaj, te tako iznova započeti rasti, tj. crtati po zaslonu. Na zaslonu se očituje bijela mrlja samo kada pilasti napon raste, za vrijeme povratka i mirovanja istog, mrlja je ugašena. To se može postići odgovarajućim pravokutnim naponom na Wehneltovu cilindru.



Slika 12: Principijelna shema generatora pilastog napona. [7]



Slika 13: Utjecaj pilastog napona. [7]

4.1.1. Dobivanje pilastog napona

Pilasti napon se dobiva na principu punjenja kondenzatora izvorom konstantne struje, što uzrokuje linearno smanjenje napona na njegovim krajevima, te naglim pražnjenjem kondenzatora. U trenutku otvaranja prekidača (slika 12) kondenzator se počinje nabijati strujom i napon mu raste prema izrazu:

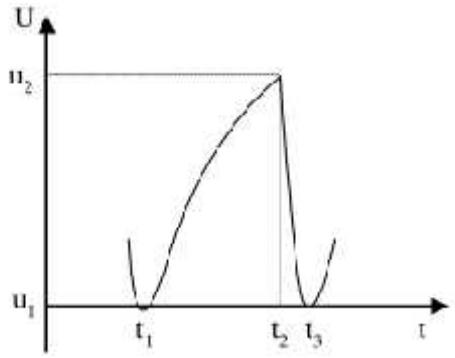
$$u = \frac{1}{C}\int_{t_1}^{t_2} i\,dt \qquad (1.33)$$

Ukoliko je struja konstanta, što osigurava element *R*, napon na kondenzatoru će rasti linearno. Ako govorimo o običnom otporniku, onda napon na kondenzatoru raste eksponencijalno po izrazu:

$$u = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \qquad (1.34)$$

U trenutku t_2 , napon na kondenzatoru dosegne vrijednost u_2, zatvaranjem tipke počinje naglo pražnjenje kondenzatora (otpor tipke mnogostruko manji od otpora *R*). Smanjenjem napona kondenzatora na početnu vrijednost, počinje novi period pilastog napona. Kako bi bilo što bolje iskorištenje istosmjerne struje, potrebno je da napon izvora bude znatno veći od u_2, jer u

tom slučaju nabijanje kondenzatora teče po približno pravocrtnom dijelu eksponencijalne krivulje nabijanja. Ukoliko to nije slučaj, te ukoliko vrijeme trajanja izbijanja kondenzatora nije kratko, dobivamo iskrivljeni oscilogram pojave koju snimamo, pa ćemo umjesto sinusoide dobiti slijedeću sliku:



Slika 14: Pilasti napon dobijen punjenjem kondenzatora. [7]

Pomoću posebnih elektroničkih sklopova, kao što je npr. Millerov integrator ili integrirajuće pojačalo, uz konstantnu struju nabijanja kondenzatora, postiže se bolje iskorištenje istosmjerne struje. Njima se dobiva linearnost pilastog napona bolja od 1% , trajanje periode napona od 1μs sve do 50 s, uz odgovarajuće promjene otpora *R* i kapaciteta *C*.

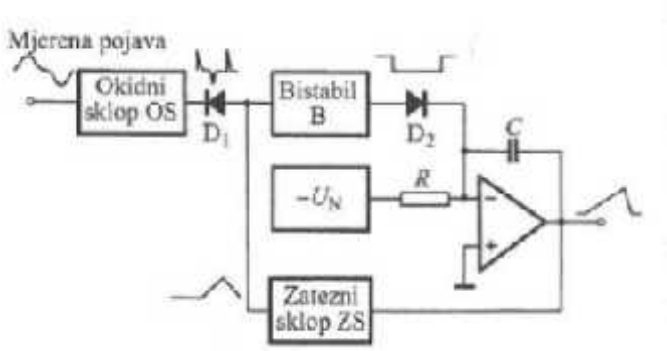
4.2. Astigmatizam i sinkronizacija

Astigmatizam katodne cijevi je pojava u kojoj otklanjanje elektronskog snopa elektronskim pločicama, što je posljedica nesavršenosti elektronske optike, utječe na fokus snopa.

Kako bismo dobili mirnu sliku promatrane periodične pojave na zaslonu osciloskopa, odnos između frekvencije pojave i frekvencije pilastog napona mora biti cijeli broj, koji se, kao i fazni pomak, za vrijeme mjerenje neće mijenjati. Ta pojava se naziva sinkronizam. Ukoliko je period pilastog napona za *n* puta veći od perioda mjerene pojave, na ekranu će se vidjeti *n* perioda mjerenog signala, a ukoliko je manji, vidjet će se samo dio jednog perioda mjerenog signala. Sinkronizacijom se postiže da crtanje novog oscilograma uvijek počinje u istoj točki promatranog signala, a za pouzdan sinkronizam je potrebno omogućiti utjecaj mjerene pojave na generator pilastog napona. To se postiže na način da se iz vertikalnog otklonskog pojačala izvede jedan dio pojačanog mjerenog napona u generator pilastog

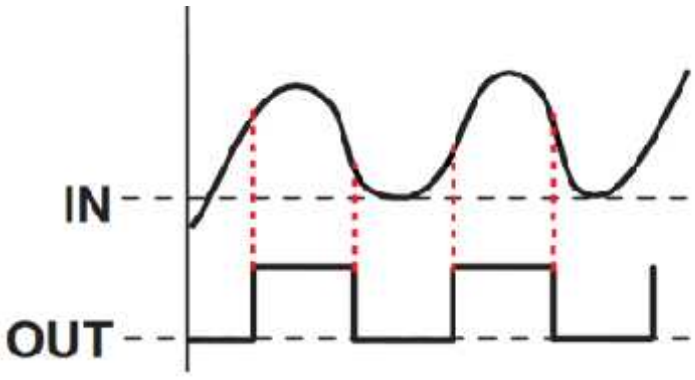
napona, te se takva sinkronizacija naziva interna, dok se vanjska sinkronizacija postiže utjecajem vanjskog signala na generator pilastog napona. U ovom slučaju se vanjski signal dovodi na odgovarajući priključak na ploči osciloskopa. Također je moguća i sinkronizacija na mrežnu frekvenciju, što se događa kada se generator pilastog napona sinkronizira naponom napajanja. Osim toga, potrebno je omogućiti promatranje pojava koje se ne ponavljaju a kratkotrajne su i prijelazne, te onih pojava koje se ponavljaju u nepravilnim vremenskim razmacima. To se postiže okidnom vremenskom bazom. Ona „okida“ jednu periodu pilastog napona nakon djelovanja odgovarajućeg signala, te je za svako novo okidanje potreban novi signal koji se dobiva ili iz mjerene pojave ili nekog drugog vanjskog izvora.

Okidni sklop se sastoji od djelila, pojačala i Schmittovog okidnog sklopa.



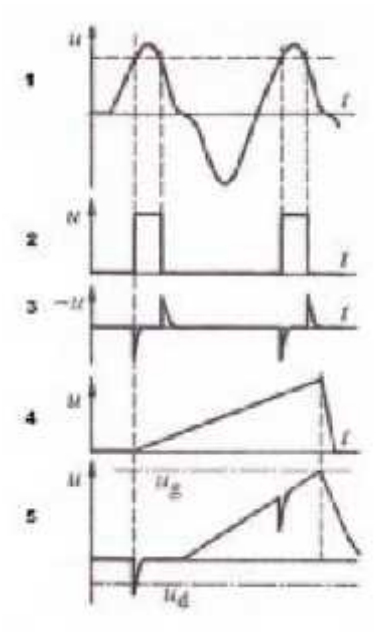
Slika 15: Okidna vremenska baza. [6]

Schmittov okidni sklop je naponski komparator koji ima dvije okidne razine (histereza). Do okidanja dolazi kada njemu dovedeni napon premaši određenu vrijednost, a kada padne ispod određene vrijednosti, se vraća u početni položaj. Zadaća mu je da svaki ulazni signal pretvara u pravokutni, smanjuje vrijeme porasta/pada ulaznog signala te otklanja šum na ulaznom signalu. Često se koristi za rekonstrukciju izobličenog digitalnog signala.



Slika 16: Rekonstrukcija digitalnog signala. [12]

Pravokutni impulsi se dalje deriviraju pomoću RC sklopa i pretvaraju u strme kratkotrajne impulse. S negativnim impulsima se upravlja radom tranzistora u bistabilu, koji zaporno polariziraju diodu D_2 i omogućuju nabijanje kondenzatora u integratoru te dobivanje pilastog napona na izlazu. Pilastim naponom se preko posebnog zateznog sklopa upravlja bistabilom i omogućuje njegov povratak u početno stanje. [14]



Slika 17: Oblici impulsi dobiveni djelovanjem vremenske baze. [14]

4.3.Načini rada vremenske baze

Krug vremenske baze analognog osciloskopa može raditi na sljedeće načine:

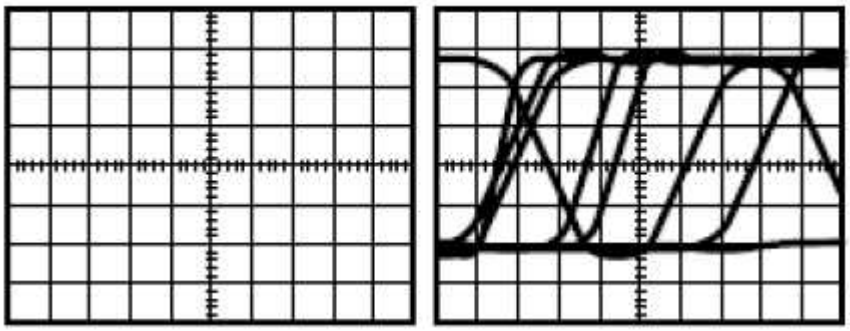
1. Automatski način – omogućuje prazan hod prebrisavanja vremenske baze na niskim frekvencijama te postavljanje vertikalne pozicije valnog oblika
2. Uobičajeni način rada – zahtijeva prisustvo signala na odabranom ulazu, dovoljno visokog nivoa kako bi mogao obaviti okidanje vremenske baze
3. Pojedinačni ili udarni signal – vremenska baza je prebrisana samo jednom, primitkom okidnog događaja

Okidački krug je taj koji osigurava da vremenska baza započne u točnoj određenoj točki na ulaznom signalu, i to svaki put kada vremenska baza vraća signal na početak zaslona. Polazišna točka je određena s četiri kontrole:

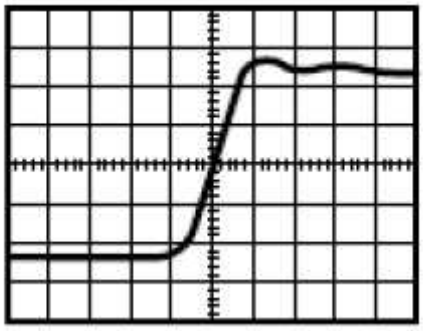
a) Kontrola izvora okidanja (trigger source) određuje od kuda dolazi okidački signal. Može se koristiti jedan ili više kanala.
b) Kontrola razine okidanja (trigger level) se postavlja na razinu napona koju okidački signal mora prijeći kako bi aktivirao okidački sklop vremenske baze.
c) Kontrola strmine okidanja (trigger slope) određuje hoće li se okidanje izvršiti na rastući ili padajući brid signala izvora. Ukoliko je razina okidanja veća ili jednaka amplitudi signala, na zaslonu se neće iscrtati slika.
d) Okidačka sprega (trigger coupling) predstavlja vezu kojom je povezan izvorišni signal s okidačkim krugom.

   Ta veza može biti:

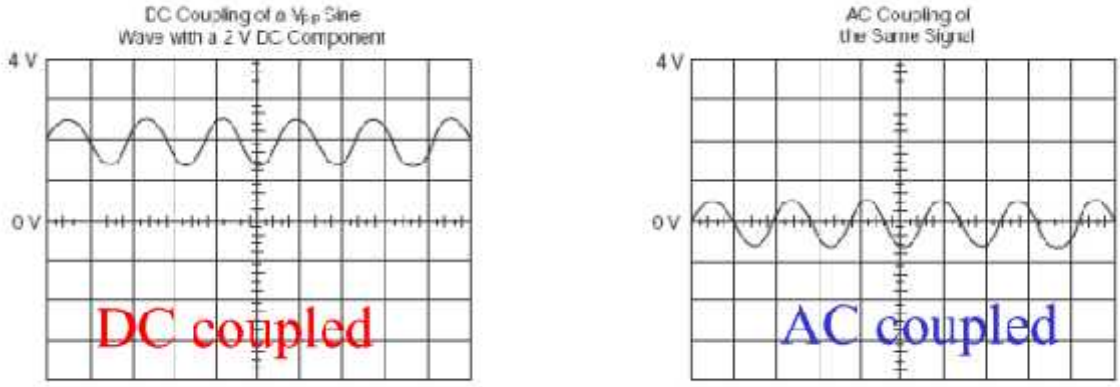
   - Istosmjerno povezivanje (DC coupling)– izvor spojen direktno na okidački krug
   - Izmjenično povezivanje (AC coupling)– izvor spojen na okidački krug preko serijskog kondenzatora
   - Vršni nivo (peak to peak level) – kada je raspon kontrole nivoa okidanja postavljen na način da bude nešto manji od vršnih vrijednosti signala
   - Niskopropusni filter – ako izvorišni signal prolazi kroz niskopropusni filter za blokiranje visokih frekvencija; vremenska baza se može okidati samo na niskim frekvencijama signala
   - Visokopropusni filter – ako izvorišni signal prolazi kroz visokopropusni filter za blokiranje niskih frekvencija (npr. prikaz signala koji sadrži velike mrežne smetnje)
   - TV okidanje – način rada u kojem je kontrola razine okidanja neaktivirana pa osciloskop koristi sinkronizacijske impulse unutar video signala



Slika 18: Neokidani signal. [44]



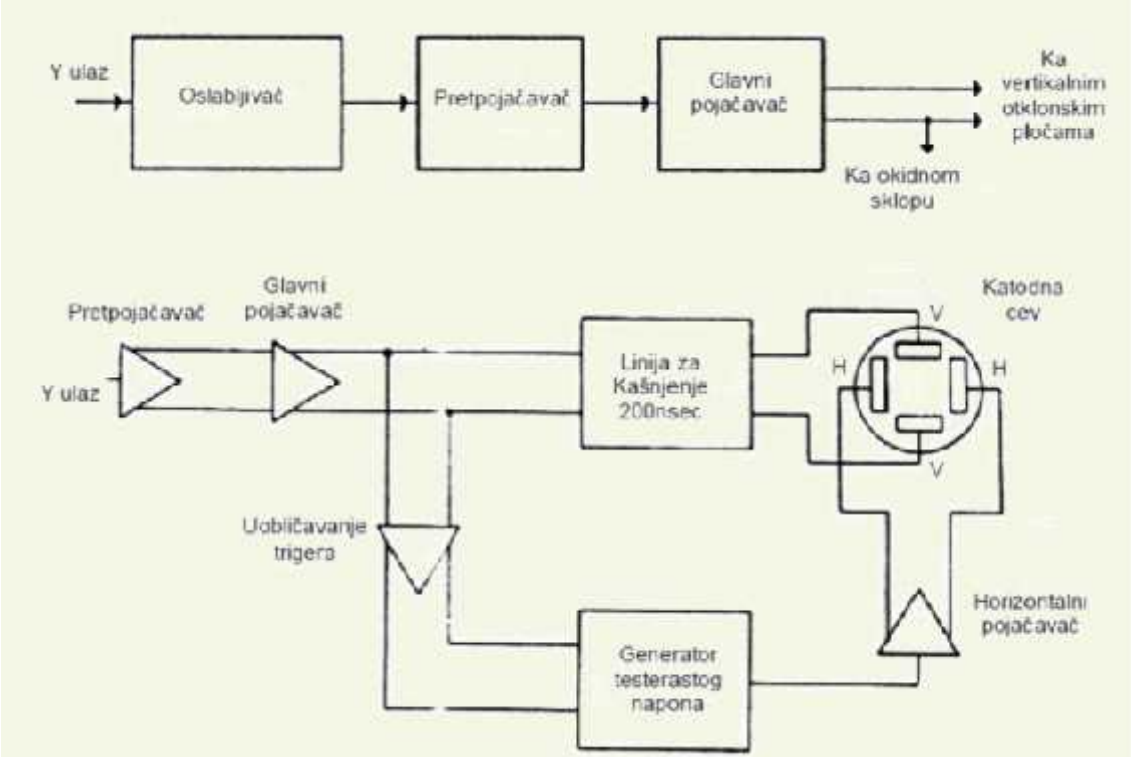
Slika 19: Okidani signal. [44]



Slika 20: DC vs AC povezivanje. [44]

5. Sustav za vertikalni otklon

Osjetljivost katodne cijevi je najčešće u granicama između 0,1 i 2 mm/V, zbog čega se mali naponi ne mogu izravno snimati, pa se za povećanje mjerenog napona upotrebljava pojačalo koje mora biti neovisno o frekvenciji, a ujedno ne smije izazvati veliki fazni pomak. Ovo pojačalo se naziva vertikalno, i njegova zadaća je omogućiti pojačan signal mjerodavne razine za pogon otklonskih pločica, bez uvođenja ikakvih mjerljivih deformacija u sustav. Otklonske pločice osciloskopa se ponašaju kao ploče kondenzatora te kada frekvencija ulaznog signala prelazi 1 MHz, struja potrebna za punjenje i pražnjenje kondenzatora formirana otklonskim pločicama raste. Tako bi vertikalno pojačalo trebalo biti u mogućnosti opskrbiti struju dovoljno da se otklonske pločice kondenzatora napune i isprazne.



Slika 21: Vertikalni pojačalo. [15]

Električni signal kasni određenu količinu vremena dok se prenosi električnim krugom. Ulazni signal na vertikalne otklonske pločice katodne cijevi će kasniti otprilike isto toliko ili čak malo duže vremena kako bi operator mogao vidjeti početni rub signala vala koji se proučava na zaslonu. U tu svrhu, linija za kašnjenje je uvedena između vertikalnog pojačala i pločica katodne cijevi.

Vertikalno pojačalo se najčešće sastoji od dva dijela: pretpojačala i glavnog pojačala.

5.1.Linija za kašnjenje

Linija za kašnjenje je dio vertikalnog otklonskog sustava, koja omogućava prikaz prvog dijela signala, iako na kašnjenje također utječu i okidački sklop i horizontalni sistem. Okidački i sklopovi vremenske baze brzo odgovaraju na okidački uvjet. Što se tiče pilastog napona, on se generira na rastući ili padajući brid signala u trenutku kada je ispunjen uvjet okidanja, a samo iscrtavanje signala započinje otprilike 100 ns nakon što je ispunjen uvjet.

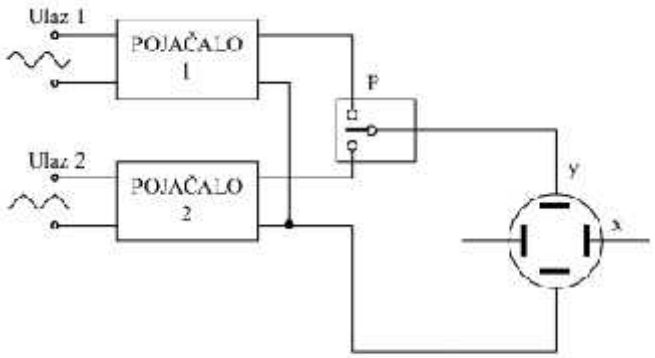
6. Posebne vrste osciloskopa

Neke od posebnih vrsta osciloskopa su:

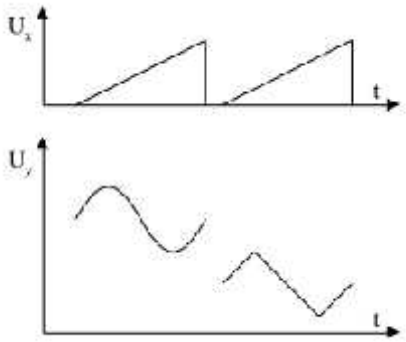
a) Dvokanalni osciloskopi
b) Osciloskopi s katodnom cijevi s više elektronskih snopova
c) Osciloskopi s pamćenjem
d) Osciloskopi s uzimanjem uzoraka

a) Dvokanalni osciloskop

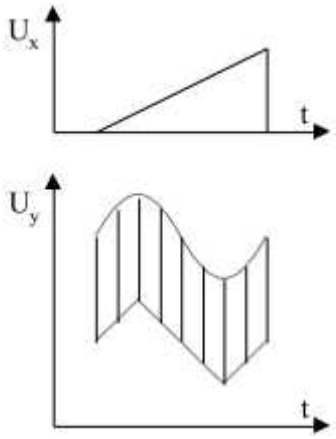
Dvokanalni osciloskopi se koriste za promatranje dviju periodičnih pojava, a sam proces se odvija pomoću katodne cijevi s jednim snopom, gdje važnu ulogu ima sistem koji taj jedan snop elektrona razdvaja u dva snopa koji reagiraju na istu vremensku bazu. U krugu za vertikalno otklanjanje se nalaze dva identična pojačala za dva odvojena ulazna kanala, a izlazi iz tih pojačala vode na elektronsku sklopku koja ih pak naizmjenično uključuje na vertikalne otklonske pločice katodne cijevi. Pri tome se izmjenjuju dvije metode, metoda zamjene i metoda sjeckanja, ili možemo reći kako postoje dva načina rada, sinkroni i asinkroni. U metodi zamjene se jedna pojava prikazuje za vrijeme jedne periode pilastog napona, druga pojava za vrijeme druge periode i tako dalje, a koristi se za signale visokih frekvencija, kada se može primijetiti diskontinuitet u iscrtavanju signala. Kod metode sjeckanja, elektronička sklopka uključuje mnogo puta jednu i drugu pojavu za vrijeme jedne periode pilastog napona, te je povoljno rješenje kod prikazivanja signala niskih frekvencija, kad relativno mala perzistencija zaslona dovodi do treperenja slike. Mirna slika kod obje metode će se dobiti jedino kada se frekvencije mjerenih pojava odnose kao cijeli brojevi, pošto generator pilastog napona pokreće jedna od mjerenih pojava.



Slika 22: Blok shema dvokanalnog analognog osciloskopa. [7]



Slika 23: Metoda zamjene; jedan signal prikazuje se za vrijeme jedne peride pilatog napona, drugi signal za vrijeme druge periode pilastog napona. [7]



Slika 24: Metoda sjeckanja. [7]

b) Osciloskop s katodnom cijevi s više elektronskih snopova

Svaki snop u ovakvim osciloskopima ima svoj otklonski sustav, čime je omogućeno promatranje više pojava koje ne moraju biti periodične. Najčešće se izrađuju osciloskopi s dva snopa. Funkcija im je slična dvokanalnom osciloskopu s razlikom da osciloskopi s dva snopa koriste posebnu katodnu cijev koja generira dva odvojena elektronska snopa.

c) Osciloskopi s pamćenjem

Kod ovih osciloskopa je omogućeno zadržavanje slike na ekranu za duži vremenski period, čime je omogućena i usporedba pojava koje se ne događaju istovremeno ili se samo jednom pojavljuju. U načelu postoje dvije vrste ovih osciloskopa: osciloskopi koji koriste posebnu katodnu cijev s pamćenjem i osciloskopi koji koriste digitalne sklopove. Ova cijev ima dva elektronska topa, jedan za upisivanje a drugi za obasjavanje.

d) Osciloskopi s uzimanjem uzoraka

Kako su osciloskopi normalne izvedbe frekvencijski ograničeni, do nekih 500 MHz, a porastom frekvencije ulaznog signala raste brzina ispisivanja snopa, na ekranu dolazi do smanjenja svjetline slike. Ukoliko su signali koje želimo promatrati ponovljivi, primjenjuje se metoda uzorkovanja čiji frekvencijski opseg može ići i do 18 GHz. Metoda uzorkovanja se bazira na transpoziciji visokofrekvencijskih signala u niskofrekvencijsko područje. Ovi osciloskopi se odlikuju osjetljivošću, prikladni su za mjerenje valnih oblika koji se ne ponavljaju i daju jasni prikaz.

6.1. Mjerenja osciloskopom

a) Mreža meridijana i paralela
b) Mjerenje napona
c) Mjerenje amplitude
d) Mjerenje jednosmjerne komponente naizmjeničnih signala
e) Mjerenje vremenskih intervala
f) Mjerenje periode i frekvencije
g) Mjerenje fazne razlike
h) Mjerenje fazne razlike primjenom Lissajousove krivulje – ili metoda usporedbe u *X*-*Y* režimu.

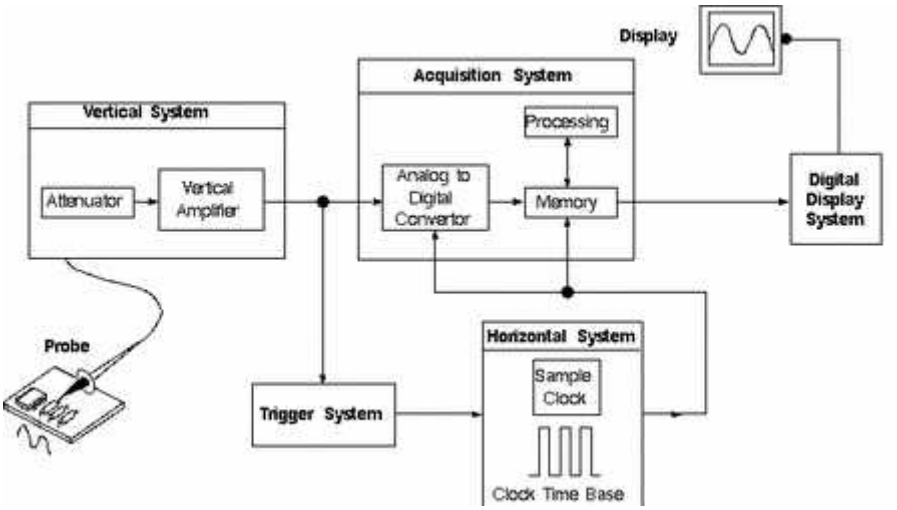
7. Digitalni osciloskop

Prednost digitalnih osciloskopa nad analognima je što mogu prikazivati prijelazne pojave, zapise koji se promatraju mogu spremati u memoriju za daljnju obradu, te je također moguće prikazivanje signala u frekvencijskoj domeni, kao i veća mogućnost sinkronizacije signala. Digitalni osciloskop ne radi direktno s dobivenim signalom, već se taj signal uzorkuje i pretvara u digitalni signal, a to se obavlja pomoću analogno – digitalnih pretvornika.

Postoji nekoliko osnovnih vrsta, odnosno podjela digitalnih osciloskopa:

a) Digitalni osciloskop za skladištenje
b) Digitalni osciloskop za uzorkovanje (uzorkovanje može biti u stvarnom vremenu ili u ekvivalentnom vremenu) – osciloskopi s digitalnim pamćenjem.
c) Digitalni fosfor osciloskop – paralelno procesiranje informacija i zasebni procesor koji omogućuju prikaz brzih tranzijenata.
d) Kombinirani osciloskop
e) PC osciloskop

U daljnjem radu, pozornost ćemo obratiti na PC osciloskop, no prije toga, nekoliko riječi o digitalnom osciloskopu.



Slika 25: Blok shema digitalnog osciloskopa. [18]

Ulazni dio digitalnog osciloskopa jednak je onom kod analognog osciloskopa, te se ulazni signal uzorkuje u pravilnim vremenskim intervalima, nakon čega se trenutne vrijednosti uzoraka odvode u ADC (Analog to Digital Converter), odnosno analogno digitalni pretvornik, iz čega izlaze binarne riječi koje predstavljaju svaki uzorak signala. Osnovna funkcija

analogno digitalnog pretvornika je odrediti amplitudu uzorka uspoređujući ga s vrijednošću referentnog napona. Ovaj proces se naziva digitalizacija.

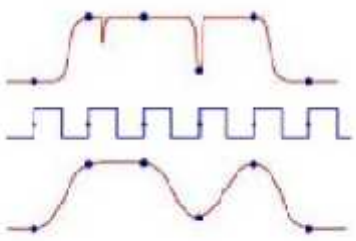
Dolaskom signala na ulaz digitalnog osciloskopa, vertikalni sustav će se automatski prilagoditi amplitudi samog signala. Dobivene binarne vrijednosti se pohranjuju u memoriju osciloskopa, a u njoj „postoji“ cirkularno polje gdje se podaci zapisuju sve dok se ne zadovolje okidni uvjeti. Podaci se iščitavaju iz memorije, gdje ih je mikroprocesor obradio kao digitalne, i odlaze u sklop za digitalno analognu pretvorbu, DAC (Digital to Analog Converter), gdje dolazi do povećanja signala i njegovog prikaza na zaslonu katodne cijevi. DAC je dio sustava za prikupljanje podataka koji uzorkuje signal. Ono što je bitno ovdje napomenuti je kako slika na zaslonu ne predstavlja signal doveden na ulaz osciloskopa, već rekonstrukciju originalnog signala.

7.1. Metoda uzorkovanja

Cilj metode uzorkovanja je osciloskopu odrediti način prikupljanja potrebnih podataka, ovisno radi li se o sporo promjenjivim signala ili brzim signalima. Za prvi slučaj, proces prikupljanja podataka je jednostavan, što rezultira preciznom slikom na ekranu. No kod brzih signala se javlja problem, jer je osciloskop u nemogućnosti prikupiti dovoljno točaka kako bi proveo analizu. U tom slučaju, osciloskop uzima uzorke na jedan od tri sljedeća načina:

1. Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

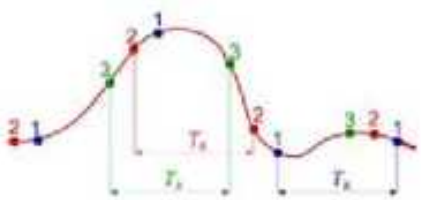
   Uzorkovanje u stvarnom vremenu se naziva još i akvizicija, i tu se uzorci uzimaju na isti način, određenim redoslijedom kako se dijelovi signala ponavljaju na zaslonu. Ukupnu akviziciju uzrokuje samo jedan okidački uvjet. Bitno je napomenuti kako se svaka nova skupina uzoraka uzima od novog okidačkog uvjeta. To nazivamo odgovarajuće vrijeme uzorkovanja, a ono poboljšava rezoluciju osciloskopa kod rekonstrukcije ponavljajućih valnih oblika iz različitih perioda.



Slika 26: Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu (valni oblici svih kanala dobiveni u istom ciklusu). [14]

2. Slučajno uzimanje uzoraka

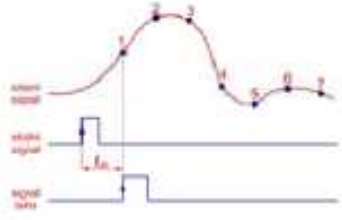
   Ciklusi uzorkovanja se ponavljaju u stvarnom vremenu i u svakom ciklusu se generira slučajni vremenski pomak između okidnog impulsa i generatora takta za uzorkovanje. Moguće je uzimati jedan ili više uzoraka po periodi signala, a ti uzorci se pohranjuju u memoriju.



Slika 27: Slučajno uzimanje uzoraka. [14]

3. Sekvencijalno uzimanje uzoraka

   Nakon ispunjenja okidačkog uvjeta s točno definiranim vremenskim pomakom uzima se jedan uzorak, te se u slijedećem ciklusu uzorkovanja vrijeme produljuje za mali korak.



Slika 28: Sekvencijalno uzimanje uzoraka. [14]

7.2. Karakteristične veličine digitalnog osciloskopa

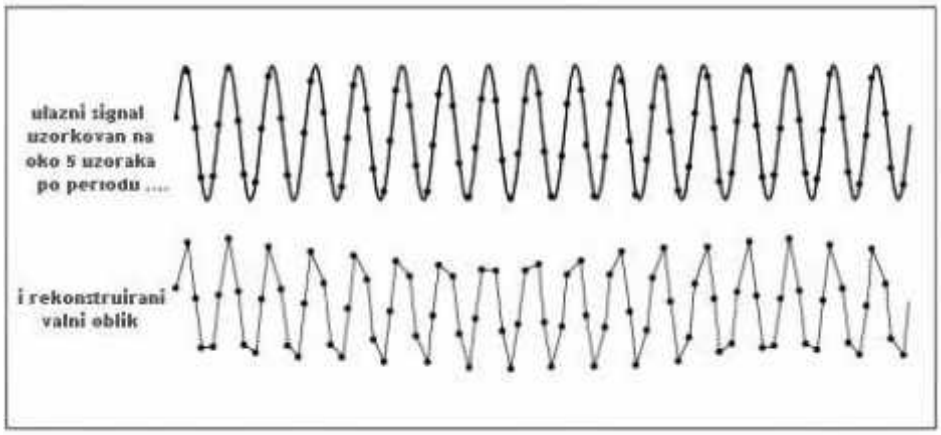
Među bitnijim karakteristikama digitalnog osciloskopa ističu se vertikalna razlučivost, vremenska baza, horizontalna razlučivost i maksimalna frekvencija uzorkovanja.

Vertikalna razlučivost – ili rezolucija osciloskopa je određena prepoznavanjem više naponskih razina ulaznog signala. Povećanje vertikalne razlučivosti omogućuje prikaz manjih detalja signala u danom valnom obliku.

Vremenska baza i horizontalna razlučivost – zadatak horizontalnog sistema je osciloskopu osigurati pohranu akviziranih uzoraka u pravom trenutku. Brzina istog ovisi o postavkama vremenske baze (s/pod).

Maksimalna frekvencija uzorkovanja – frekvencija uzorkovanja mora biti barem deset puta veća od maksimalne frekvencije signala kojeg želimo promatrati. Vrijednosti te frekvencije se kreću od 10M uzoraka/s sve do 20G uzoraka/s. Ukoliko se želi istovremeno promatrati nekoliko pojava, frekvencija uzorkovanja se mora smanjiiti, a razlog tomu je što osciloskopi najčešće imaju jedan AD pretvornik.

Prosječna vrijednost koja garantira dovoljno signalnih detalja je deset uzoraka u periodu, dok za signale s manje detalja taj broj je svega pet uzoraka u periodu.



Slika 29: Signal uzorkovan s pet uzoraka u periodu. [10]

8. PC (računalo) kao osciloskop

Nakon analognih osciloskopa, daljnjim razvojem i usavršavanjem nastali su digitalni osciloskopi, koji su u koječemu prednjačili pred analognima, no ostao im je jedan nedostatak, a to je pristupačnost, odnosno cijena. Iz tog razloga, na tržištu su se počele pojavljivati alternative u obliku analogno digitalnih pretvornika, koji se spajaju s računalom putem USB-a ili kao PCI kartice, a računalo služi za prikaz i obradu signala. Jedna od mogućnosti je i korištenje zvučne kartice računala kao analogno digitalnog pretvornika, te prikazivanje signala uz pomoć određenih softvera.

Osim cijene, velika prednost je i njihova fleksibilnost u konstruiranju sustava kakvog želimo, odnosno kakav odgovara našim potrebama. Kod virtualnih mjernih uređaja lako možemo mijenjati prvobitnu funkciju, čime nam osciloskop ne služi samo za prikaz i mjerenje signala, već njime možemo obrađivati signal na način koji se ne može postići samo hardverski, te time osciloskop preuzima neke funkcije koje prvobitno nisu zamišljene za njega.

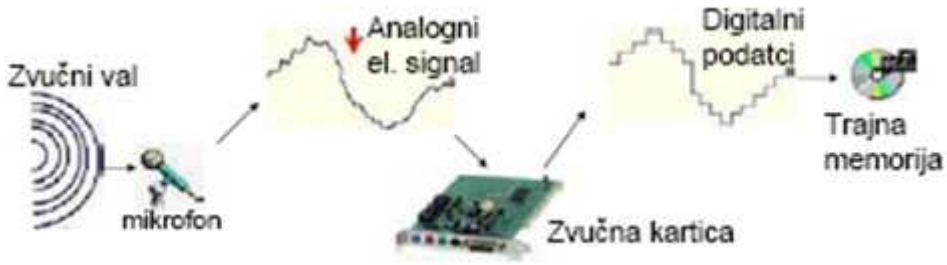
8.1. Zvučna kartica kao analogno digitalni pretvornik

Zvučnom karticom se naziva elektronički sklop (pretvornik) koji analogne signale pretvara u digitalne i obratno. Taj postupak unosa zvuka u računalo i njegova pretvorba iz analognog u digitalni oblik se naziva digitalizacija, i odvija se u tri koraka. U prvom koraku se pomoću npr. mikrofona, zvuk pretvara u analogni električni signal. Nakon toga u analogno digitalnom pretvorniku zvučne kartice se taj analogni električni signal pretvara u digitalni oblik, te se na kraju digitalni oblici kodiraju, i ukoliko ima potrebe, sažimaju i pohranjuju na disk. Zadatak analogno digitalnog pretvornika u zvučnoj kartici je mjeriti ulazni električni signal i dobivene vrijednosti zapisivati u obliku niza brojeva koji se još nazivaju i uzorci, a niz takvih uzoraka čini digitalni zapis zvuka.

Glavni dijelovi zvučne kartice su:

- Digitalno analogni konverter – pretvara digitalne podatke o zvuku iz računala u analogni zvuk koji se potom šalje zvučnicima

- Analogno digitalni konverter – vrši obrnuti proces od digitalno analognog konvertera, odnosno pretvara zvuk sa audio ulaza u digitalne podatke koje računalo može obrađivati
- Specijalizirani mikroprocesor – vrši dio obrade podataka prilikom analogne i digitalne pretvorbe
- Memorija – ubrzava obradu podataka na način da ih privremeno pohranjuje
- Razni ulazni i izlazni priključci



Slika 30: Proces digitalizacije. [45]

Razni softveri omogućuju stereo zvučnim karticama osciloskopski prikaz na zaslonu računala. Zvučne kartice su optimizirane na signale do 20 kHZ, ali se ova ograničena propusnost može proširiti.

8. Alati za prikaz i obradu signala

8.1. Winscope

Winscope je besplatan softverski program koji koristi zvučnu karticu kako bi prikazao rezultate ulaznih valnih oblika. Osim određenih mogućnosti koje nudi osciloskop, kao na primjer proučavanje valnih oblika u realnom vremenu, mjerenje frekvencije te ostalo, Winscope ima skladište i snažan FFT, odnosno brze Fourieove transformacije, što mu omogućuje da djeluje kao spektralni analizator. Koristeći ovaj program, možemo prikazivati jedan ili dva ulazna signala, ili njihovu međusobnu ovisnost.

Karakteristike programa Winscope:

- Duljina međuspremnika: 52 ms
- Propusnost: 20 Hz – 20 kHz (maksimum)
- Razina ulaznog signala: ograničena karakteristikama zvučne kartice
- Osvježenje zaslona: 6 kadrova po sekundi

Nedostaci programa Winscope:

- Razina amplitude nije kalibrirana pa se teško koristi kao digitalni multimetar
- Relativno niska propusnost
- Mogućnost oštećenja računala prilikom povezivanja s nepoznatog izvora signala
- Ukoliko na izvor nije doveden nikakav signal, program prikazuje lažni signal velike amplitude koja se povećava s vremenom, te se to objašnjava smetnjama na mikrofonskom ulazu zvučne kartice
- Nemogućnost računanja Fourieove transformacije za dva ulazna signala u realnom vremenu

8.2. Soundcard Oscilloscope

Program Soundcard Oscilloscope podatke prima iz zvučne kartice s 44,1 kHz i 16 bitnom rezolucijom. Raspon frekvencije ovisi o samoj zvučnoj kartici, no frekvencija od 20 – 20 000 Hz bi trebala biti moguća sa svim modernim karticama. Program prikazuje signale za dva kanala, oblike sinusa, kvadrata, trokuta i pilaste oblike napona, te različite šumove spektra pokriva u frekvencijskom području od 0 do 20 kHz. Signali se također mogu predočiti matematičkom relacijom, a dostupni su na izlazu mikrofona zvučne kartice. Ti signali mogu

biti pohranjeni natrag u osciloskop kako bi se generirale Lissajousove krivulje u *x-y* načinu rada.

8.3. Visual Analyzer

Visual Analyzer je audio program, proizvod tvrtke Sillanum Softvare. Program je besplatan, a njegova instalacija od samo par megabajta je dostupna na Internet adresi www.sillanumsoft.org. Visual Analyzer je kompletan profesionalni softver, koji radi u realnom vremenu, te se na računalu može korisiti u više svrha, odnosno može se transformirati u brojne mjerne instrumente:

1. Osciloskop (dva kanala, *x-y* osi, vremenska podjela, trigger)
2. Analizator spektra s prikazom amplitude i faze (linearni i logaritamski prikaz, linije...)
3. Generator valnih oblika (triangular, square, sinus, noise, pulsni generator)
4. „Frequency metter“ (s prikazom vremena i raspona frekvencija)
5. Volt – metar
6. „Filtering“ uređaj (low pass, hi pass, band pass, band reject...)
7. Potpuni softverski konverter za digitalno – analognu konverziju (za kompletnu rekonstrukciju signala) [28]

Funkcije programa Visual Analyzer-a:

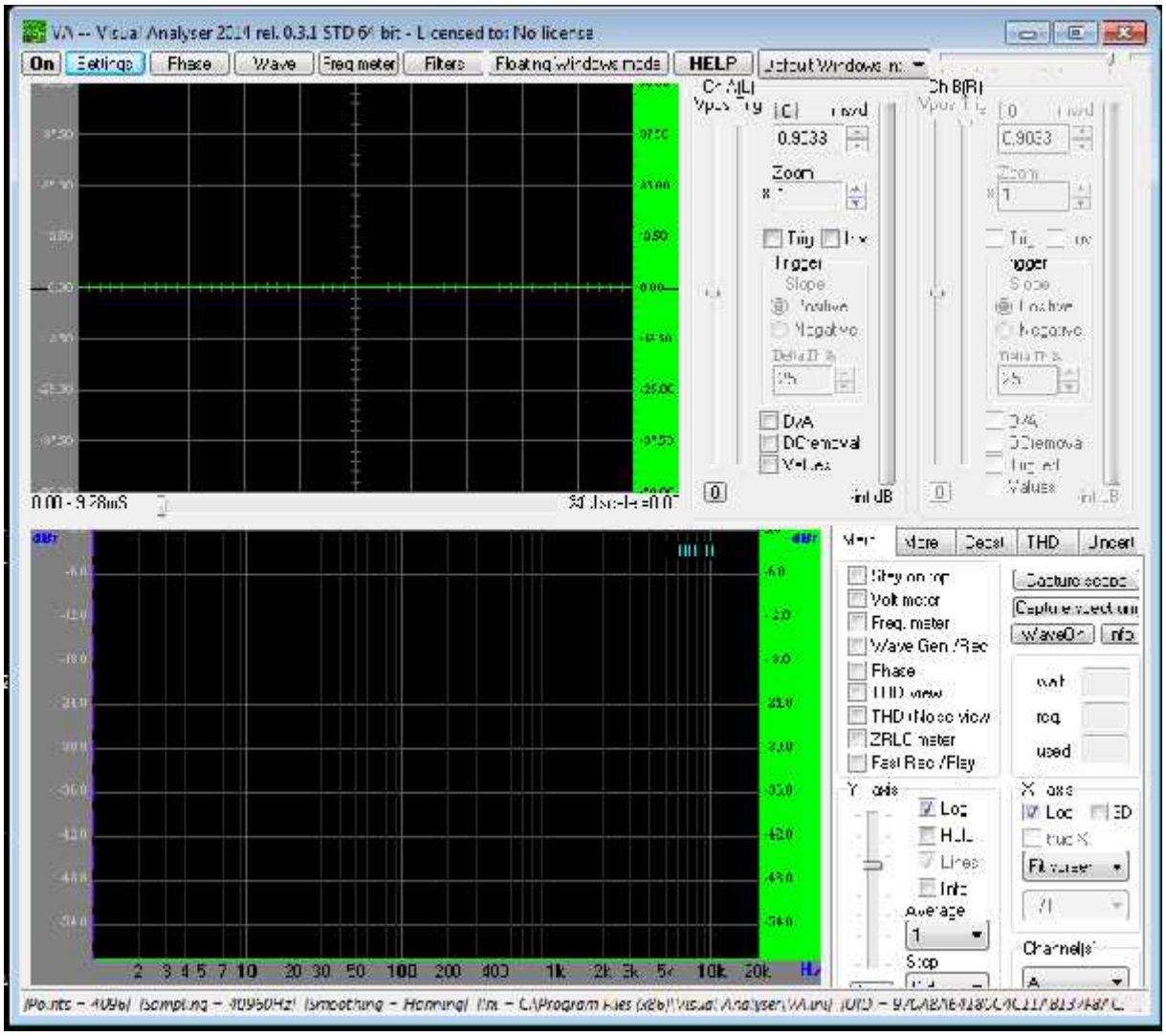
1. Graf „Call“ – prikazuje pozive odnosa među programskim jedinicama i funkcije Graph
2. Poziv „Tree“ – prikazuje pozive odnosa među jedinicama programa i funkcije Tree
3. Logički protok – prikazuje strukturu pojedinih programskih jedinica ili funkcija
4. Statistički popis – prikazuje statističke informacije pojedinih programskih jedinica ili funkcija
5. Argument popisa – prikazuje stvarne argumente i pseudo argumente koji su prošli između programskih jedinica ili funkcija
6. Refrenca popisa – prikazuje unakrsne referentne informacije za pojedinačne programske jedinice ili funkcije

7. Globalni popis – prikazuje globalne podatke informacija, globalne podatke u C-u, zajedničke blokove ili module potprograma u Fortran-u[1]
8. Utvrđivanje je li program standardno usklađen Fortran-u
9. Ispis

Ostale karakteristike programa Visual Analyzer:

- Memo prozori (data log) za analizu i pohranjivanje vremenskih serija, spektrara i faza s „triggering“ događajima; mogućnost spremanja grafike u raznim formatima (.tee,.txt, WMF) i njihovo prikazivanje s unutrašnjim preglednikom
- Kompenzacija frekvencija: mogućnost stvaranja/ugađanja prilagođenih frekvencijskih raspona i njihovo dodavanje na analizator spektra
- Podrška za 8/16/24 bitne zvučne kartice putem API(Application programming interface – aplikacijsko programsko sučelje) poziva
- Neograničeno uzorkovanje frekvencija (ovisi o mogućnostima zvučne kartice)
- Cross korelacije
- Proširena mjerenja ukupne harmonijske distorzije, s automatskim zamahom, kompenzacijom i data log-om
- Kalibracijski mehanizam (može se kalibrirati VA mjerilo izravno u volte, decibele ili postotke mjerila)
- Valne datoteke se mogu snimati i reproducirati
- Moguć unutarnji unos
- Visual Analyzer nudi mogućnost izbora izvora signala kojeg prikazujemo te tako možemo promatrati signal koji generiramo na računalu i šaljemo na izlaz zvučne kartice

[1] Fortran je ime za proceduralni, imperativni programski jezik koji je bio razvijen 50-ih godina 20.stoljeća; posebno namijenjen numeričkim proračunima.

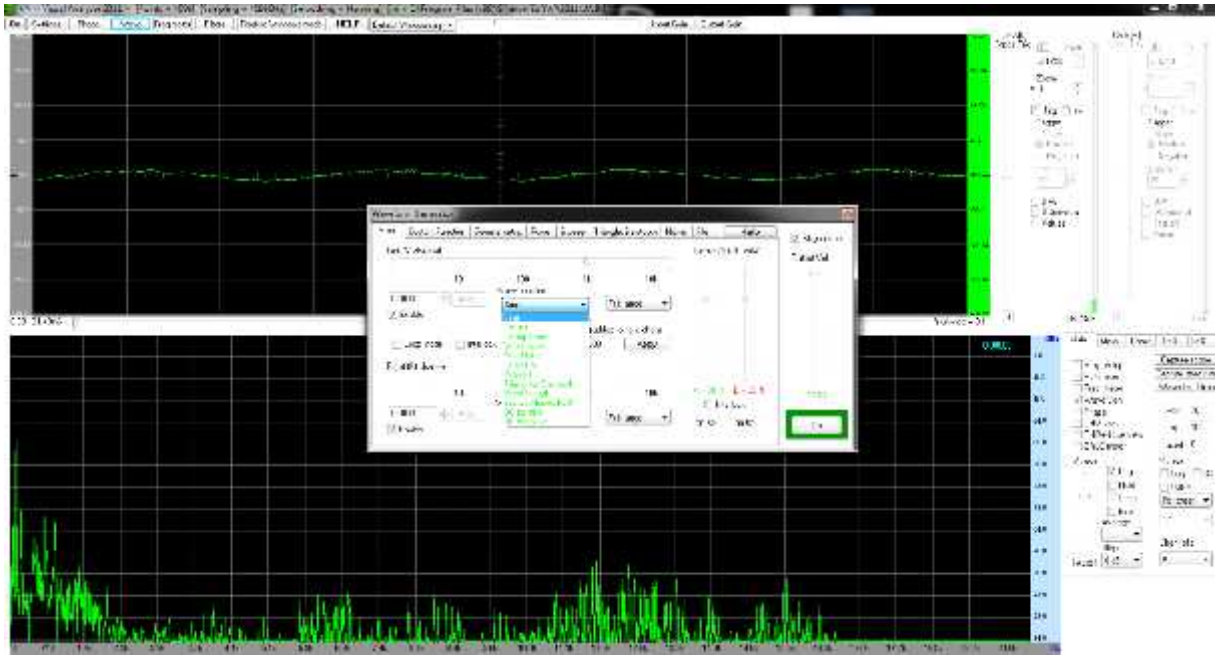


Slika 31: Sučelje programa Visual Analyzer.

Sučelje programa je podijeljeno na nekoliko dijelova, s time da se na gornjem dijelu nalaze brojni izbornici u kojima korisnik može podešavati postavke programa ili uključivati neke dodatne opcije, ukoliko se jave potrebe za time. Srednji dio čine dva prozora, gornji i donji, i svaki od njih ima svoju ulogu. Gornji prozor prikazuje periodičnost valnih oblika koji se promatraju i njihove amplitude, a donji prozor prikazuje frekvencije koje se pojavljuju u promatranom uzorku, tj. valnom obliku. Desni dio sučelja čine izbornici za podešavanje karakteristika prikaza, među kojima je i podešavanje razine ulaznog signala, raspon prikaza na osima, te dodatne funkcije programa.

Frekvencija izvora se može u Visual Analyzer-u odrediti s velikom preciznošću, do čak 4 decimale, što ovisi o izvoru zvuka, načinu prijenosa zvučnog signala, količini šuma koji je obuhvaćen i sl. Promjene faze vala u vremenu je moguće promatrati koristeći se „Phase“ prikazom, kojega je moguće prilagođavati.

Još jedna od mogućnosti je generiranje raznih valnih oblika proizvoljne frekvencije. Tako je moguće je generirati pravilne oblike valova (sinusne, pravokutne, trokutaste), valne uzorke nepravilnih oblika (šumove ili pulseve), te oblike koji nastaju postavljanjem neke proizvoljne matematičke funkcije. [28]



Slika 32: Mogućnosti pri generiranju valnih oblika

Što se tiče načina prihvata signala, ono se može odviti putem mikrofona, iz nekog vanjskog izvora zvuka direktno spojenog odgovarajućim kabelom, ili sa CD/DVD uređaja na računalu. Ukoliko se prilikom analize jave šumovi, moguće ih je korigirati filterima koje Visual Analyzer posjeduje.

10. Mjerenja pomoću Visual Analyzer-a

Ako Visual Analyzer stavimo u kontekst demonstracijskog softvera u nastavi fizike, u kombinaciji sa akustikom ćemo vidjeti mogućnost kreiranja velikog broja demonstracijskih vježbi. Te će vježbe pripomoći boljem i lakšem predočavanju, kao i razumijevanju akustičnih pojava kod učenika. Osim u akustici, Visual Analyzer možemo primjeniti i u području elektriciteta i magnetizma.

Prije nego li krenemo s demonstracijskim pokusima, Visual Analyzer je potrebno kalibrirati, kako bismo dobili što točnije rezultate mjerenja. Također, postupak kalibracije je potreban jer Visual Analyzer bez kalibracije rezultate mjerenja prikazuje u postocima pune skale, a nakon kalibracije sami određujemo želimo li da nam rezultati budu prikazani u voltima, milivoltima ili decibelima. Postupak kalibracije je sljedeći:

- Za početak, potreban nam je sinusni val pogodne i povoljne razine, koja je u domeni i frekvencijskom rasponu zvučne kartice.
- U Visual Anaylzer-u pokrenemo oba kanala
- Dovedemo poznati signal ili na oba kanala, ili prvo na lijevi kanal
- Označimo Value Box (vrijednosti) na oba kanala kako bismo mogli pratiti kalibraciju. Prije iste, sve amplitude će biti pokazane kao %fs
- Otvorimo Settings (postavke), odaberemo Calibrate (kalibracija)
- Iz padajućeg izbornika odaberemo ulazni izvor signala
- Na vertikalnom regulatoru jačine odaberemo razinu na kojoj ćemo korisiti zvučnu karticu
- Odaberemo Unit (jedinicu) koju želimo kalibrirati (npr. volti)
- Unesemo razinu kalibracije signala koju ćemo primjeniti na ulaz
- Pritisnemo Start Measure Signal (L) (počni mjeriti signal). Nakon nekoliko trenutaka nam se prikaže vrijednosti Detected Levels (otkrivenih razina) u %fs (full scale)
- Označimo Apply calibration left channel (primjeni kalibraciju lijevog kanala)
- Isti postupak ponovimo i za desni kanal
- Provedenu kalibraciju spremimo. Ukoliko to ne učinimo, nakon što zatvorimo program, izgubit ćemo kalibraciju, te ponovno morati provoditi postupak.

10.1. Eksperimentalni dio

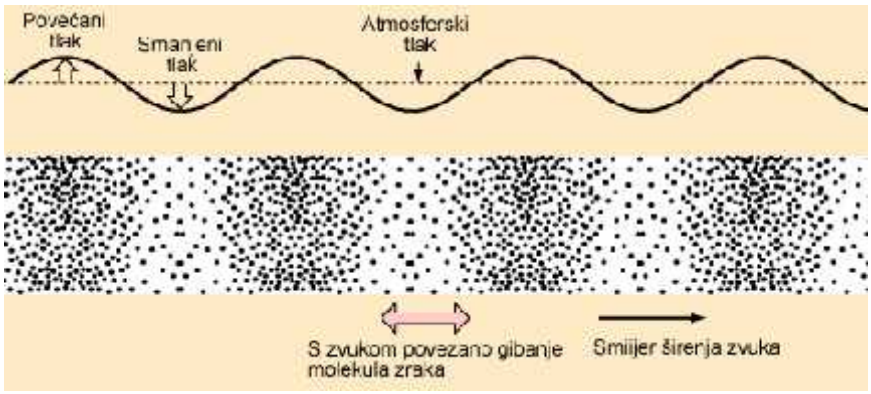
Za sve dalje navedene vježbe, provedena je kalibracija, i određene su početne postavke programa:

- Brze Fouireve transformacije (FFT veličine 2048 uzoraka)
- Frekvencija uzorkovanja (Frequency sampling) 44100 Hz
- Frekvencijski opseg 0-22050 Hz
- Mono channel
- Volt/peak to peak
- Trigger – positive 25%
- Prikaz log

10.1.1. Glazbeni instrumenti (osnovna frekvencija i frekvencija viših harmonika)

PRIBOR: glazbeni synthesizer, mikrofon, osobno računalo s instaliranim softverom (Visual Analyzer) kao osciloskopom

TEORIJSKA PODLOGA: Zvuk se sredstvom širi u obliku zvučnih valova. To su longitudinalni valovi čijim širenjem titra gustoća u sredstvu. Kao izvor zvuka se uzima neko tijelo koje titra, kao npr. membrana zvučnika, uz koju nastaje usko područje stisnutog zraka kada se membrana giba prema van, a u slučaju kada se giba prema unutra, uz nju se povećava slobodan prostor za čestice zraka pa se zapravo gustoća zraka na trenutak smanji. Tim titranjem membrane nastaju izmjenična područja smanjene i povećane gustoće zraka, te se to titranje rasprostire zrakom u obliku longitudinalnih valova.



Slika 33: Širenje zvuka (longitudinalni val). [48]

Valnu duljinu vala možemo odrediti kao razmak između vrhova dvaju susjednih bregova, označava se slovom λ a vrijednost se iskazuje u metrima.

Udaljenost između dviju točaka najvećeg zgušnjenja ili razrjeđenja medija kroz koji se širi val se naziva perioda T.

Amplituda predstavlja maksimalan otklon (elongacija) od srednje vrijednosti veličine kojom se opisuje val ili titranje.

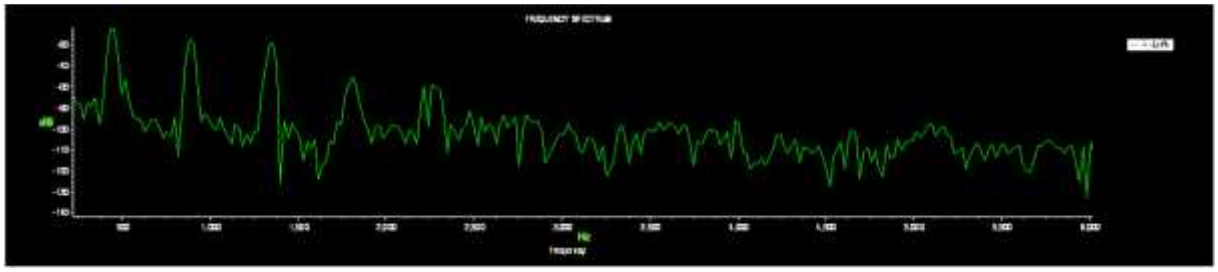
Frekvencija ili učestalost se definira kao broj titraja u sekundi; iskazuje se mjernom jedinicom herc (Hz). Frekvencije zvučnih valova u rasponu od oko 16 Hz do 20 kHz u ljudskom uhu stvaraju osjet zvuka. Zvuk frekvencije manje od 16 Hz se naziva infrazvuk, a veće od 20 kHz ultrazvuk, dok se zvuk frekvencije iznad 10^{10} naziva hiperzvuk.

Što se tiče glazbenih tonova, oni se mogu razlikovati visinom, koja je određena frekvencijom zvučnih valova, te jakošću i bojom. Ton jednake frekvencije mogu stvoriti razna glazbala, no tonovi koje proizvode su različitog oblika pripadnog zvučnog vala. Svaki neharmonijski val frekvencije f može se prikazati kao rezultat interferencije harmonijskih valova čije su frekvencije $f, 2f, 3f, 4f,...$ koji imaju određene amplitude. Takav prikaz valova pomoću superpozicije harmonijskih valova zove se Fourierov razvoj. Kaže se da je f osnovna frekvencija, a frekvencije $2f, 3f, 4f,..$ su viši harmonici. [3]

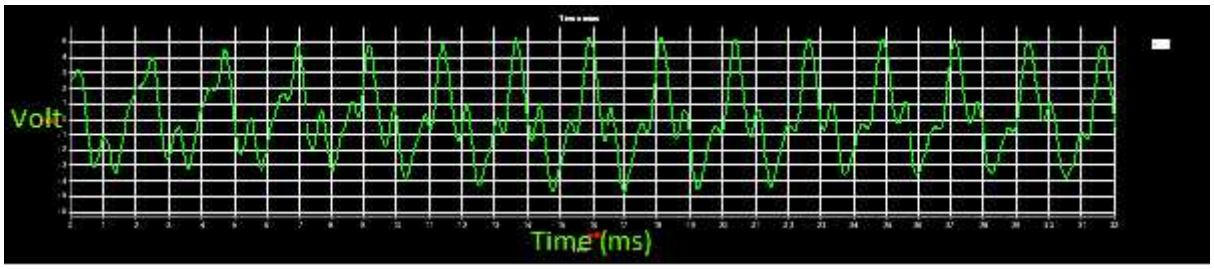
OPIS POKUSA: Na glazbenom sintesajzeru redom za tri različita instrumenta odsviramo notu A, poznate frekvencije 440 Hz. Promatramo izgled zvučnog vala na osciloskopu, te primjećujemo kako je za svaki instrument on različit. Visual Analyzerom vršimo spektralnu analizu, i na temelju dobivenih rezultata donosimo zaključak. Za svaki instrument mjerenje ponavljamo tri do pet puta.

REZULTATI MJERENJA:

<u>Glasovir</u>



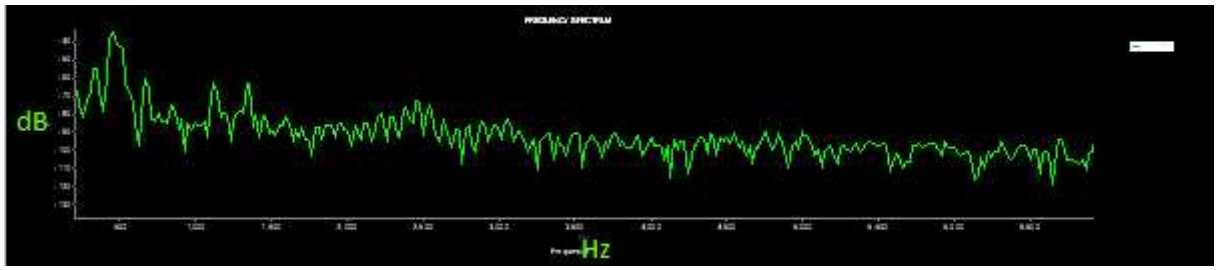
Slika 34: Spektar A note odsvirane na glasoviru.



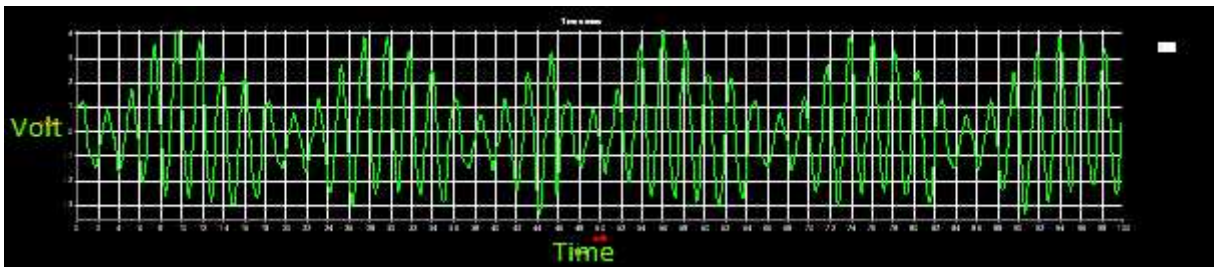
Slika 35: Valni oblik u harmonicima glasovira.

- Izmjerena prosječna osnovna frekvencija (3 mjerenja): 425, 53 Hz, odnosno $(425{,}53 \pm 3{,}8\ \text{Hz})_3$.
- Mjerenja ukazuju na to da se formira pravilan stojni val osnovne frekvencije ≈ 440 Hz, te viši harmonici te frekvencije. Amplituda opada strmo od osnovnog tona i opada prema višim harmonicima. Odstupanje dobivenih vrijednosti od poznate vrijednosti je 3,3%.

Gitara (električna)



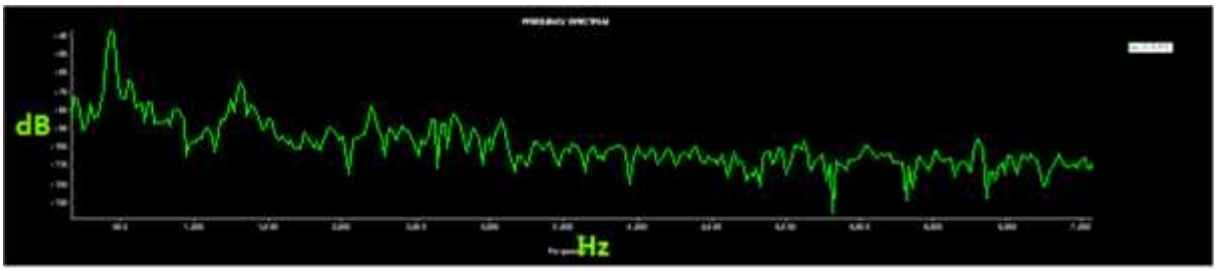
Slika 36: Spektar A note odsvirane na gitari.



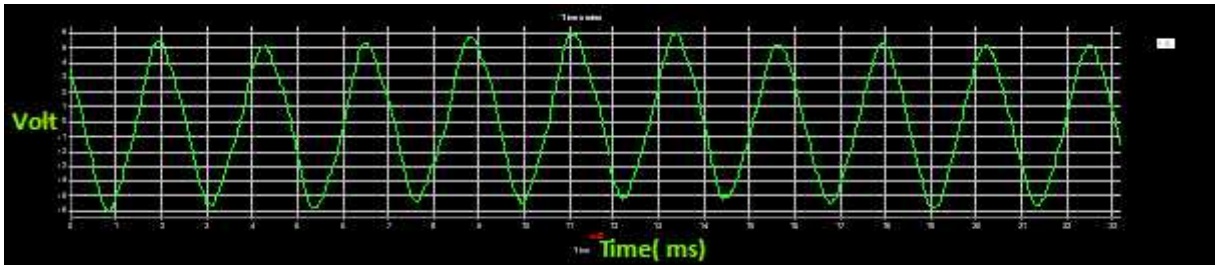
Slika 37: Valni oblik u harmonicima gitare.

- Izmjerena prosječna osnovna frekvencija (3 mjerenja): 449,14 Hz, odnosno $(449{,}14 \pm 6{,}02\ \text{Hz})_3$
- Harmonici nisu pravilno raspoređeni, amplituda opada strmo od osnovnog tona prema višim harmonicima
- Prosječno odstupanje dobivenih vrijednosti od poznate vrijednosti iznosi 2%

Glazbeno zvono



Slika 38: Spektar A note glazbenog zvona



Slika 39: Valni oblik glazbenog zvona

- Izmjerena prosječna osnovna frekvencija (3 mjerenja): 438,29 Hz, odnosno $(438{,}29 \pm 3{,}7\ \text{Hz})_3$
- Pokazuje se val osnovne frekvencije s pripadajućim višim harmonicima, gdje imamo pad amplitude prema istima
- Prosječno odstupanje dobivenih vrijednosti od poznate vrijednosti iznosi 0,4%

ZAKLJUČAK: Iz gore priloženih slika je vidljiva razlika između valnih oblika glasovira, glazbenog zvona i gitare. Na osnovu tih razlika se dobiva dojam o različitim bojama zvuka, tj različitim glazbenim instrumentima. Utvrđena je istinitost valne teorije zvuka te pokazana funkcionalnost sustava. Na temelju dobivenih podataka možemo vršiti daljnju analizu zvukova i njihovih karakteristika. Osim akustički, primjenom programa Visual Analyzer, učenici mogu steći i vizualni dojam o zvuku i kombinacijom njih lakše usvajati trajne spoznaje o prirodi zvuka.

10.1.2. Zvučni udari

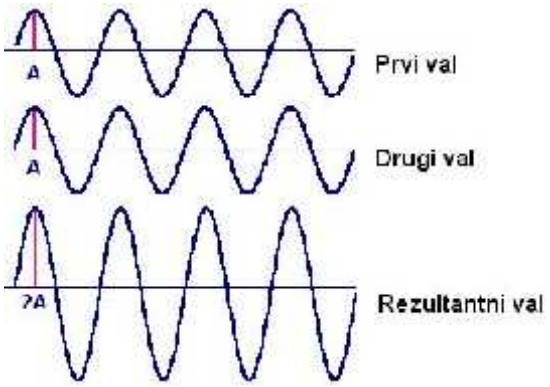
PRIBOR: Glazbene viljuške poznate frekvencije (440 Hz) (2 komada), batić, računalo s instaliranim Visual Analyzer-om, mikrofon, uteg ili uzak komadić gumene cijevi



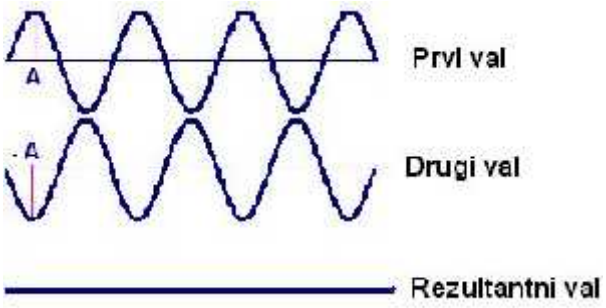
Slika 40: Pribor potreban za izvođenje pokusa.

TEORIJSKA PODLOGA: Interferencija valova je pojava superpozicije (zbrajanja, slaganja) valova koji se susretnu u jednoj točki prostora. Ona može biti konstruktivna ili destruktivna. Interferencija je konstruktivna ako u trenutku potpunog preklapanja valova novonastali val ima dvostruko veću amplitudu od svakog pojedinačnog vala. Interferencija je destruktivna ako se u trenutku potpunog preklapanja suprotni valovi potpuno poništavaju, odnosno ukupni val je jednak ništici.

Glazbena vilica slabo prenosi svoje titranje na zrak, no u slučaju rezonancije, npr. sa stolom, prenošenje je mnogo jače. Zbog toga se glazbena viljuška stavlja na rezonantnu kutiju kojoj je duljina jednaka ¼ valne duljine osnovnog tona. Kutija ima upravo toliku duljinu da zrak zatvoren u njoj ima vlastitu frekvenciju titranja jednaku frekvenciji glazbene viljuške, te zato rezonantno preuzima energiju od zatitrane viljuške i time se znatno povećava glasnoća zvuka. U sprezi s kutijom, glazbena viljuška maksimalno prenosi energiju titranja na zrak u kutiji pri čemu na otvorenom kraju nastaje trbuh longitudinalnih valova i titraji se nesmetano šire kroz zrak. Pojačanje tona kutijom mora zadovoljavati zakon očuvanja energije. Iako je snaga titranja veća, energija ostaje ista.



Slika 41: Konstruktivna interferencija. [49]



Slika 42: Destruktivna interferencija. [49]

Udari nastaju interferencijom valova različitih frekvencija, a frekvencija udara je učestalost maksimalne amplitude (pozitivne i negativne). Za jednake amplitude sinusnih valova, vrijediti će:

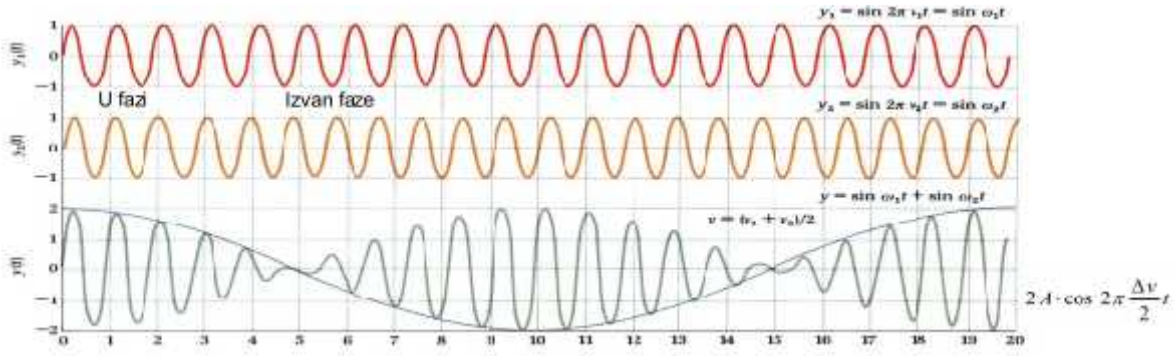
$$A \quad 2\pi f_1 t + A \quad 2\pi f_2 t = 2A \quad 2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t \quad 2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t \quad (1.35)$$

Izraz (1.35) predstavlja fenomen udara s frekvencijom jednakom razlici frekvencija dva vala, odnosno frekvencija udara je dana kao:

$$f_u \quad = |f_1 - f_2| \quad (1.36)$$

Ako su početne frekvencije blizu jedna drugoj, prvi član kosinusa frekvencije $\frac{f_1 - f_2}{2}$ opisuje periodičku varijaciju amplitude titranja (anvelopu) drugog člana kosinusa u izrazu (1.35), čija je frekvencija $\frac{f_1 + f_2}{2}$, odnosno prosječna vrijednost dviju frekvencija. Kako ljudsko uho nije osjetljivo na faze, samo na amplitude ili intenzitet zvuka, moguće je čuti samo apsolutne vrijednosti anvelope. Frekvencija anvelope ima dvostruku frekvenciju kosinus, odnosno frekvencija udara je dana izrazom (1.36). U fizici se izraz $\cos(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t)$ tumači na način, da

kada je jednak jedan, dva vala su u fazi i interferiraju konstruktivno. A kada je izraz jednak nuli, valovi nisu u fazi i interferiraju destruktivno.

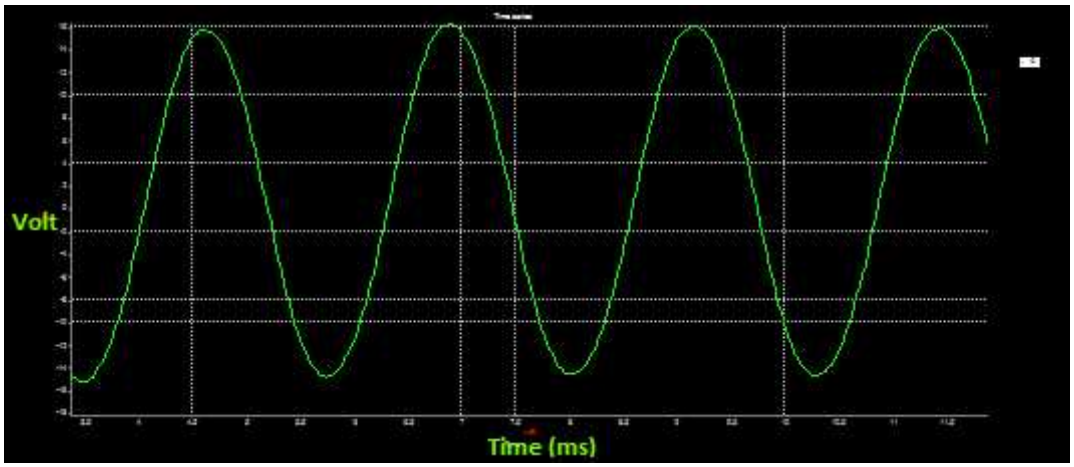


Slika 43: Zvučni udari. [50]

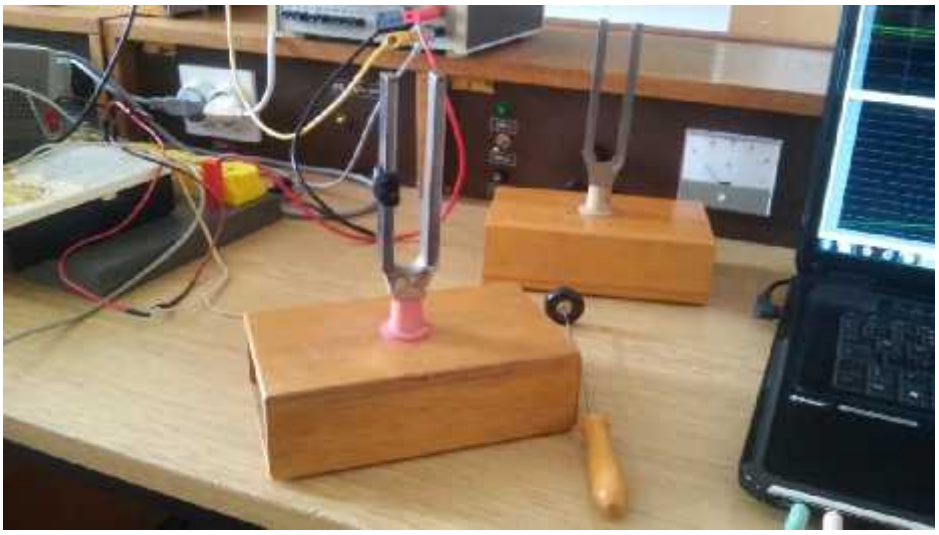
OPIS POKUSA: Za pokus koristimo dvije glazbene viljuške jednakih frekvencija, učvršćene na rezonatorima. Viljuške postavimo na neku međusobnu određenu udaljenost, te na jednu od vilica postavimo ili uteg ili komadić gumene cijevi kako bismo joj promijenili frekvenciju. Udarimo li batićem obje glazbene viljuške i pažljivo osluškujemo zvuk, čut ćemo zvučne udare. Istovremeno programom Visual Analyzer promatramo valni oblik i frekvenciju udara. Demonstrirat ću jedan zvučni udar.

REZULTATI MJERENJA:

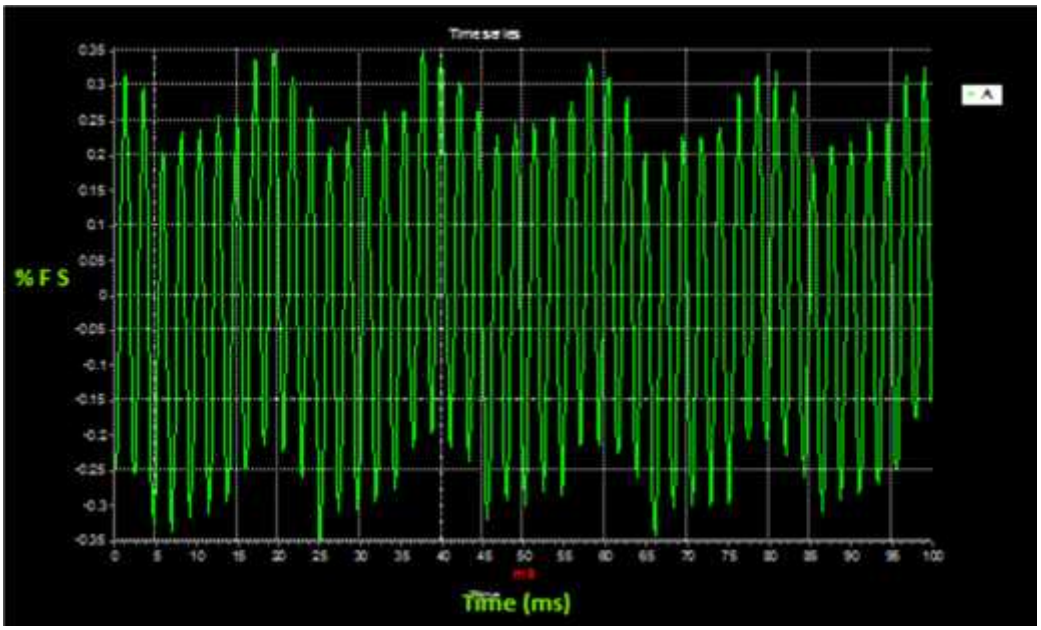
Titranje glazbene viljuške:



Slika 44: Frekvencija glazbene viljuške. $f_0 = 438H$



Slika 45: Središnji položaj gumene cijevi na glazbenoj vilici.



Slika 46: Valni oblik zvučnih udara u središnjem položaju. $f_1 = 385\ H$, $f_2 = 440\ H$

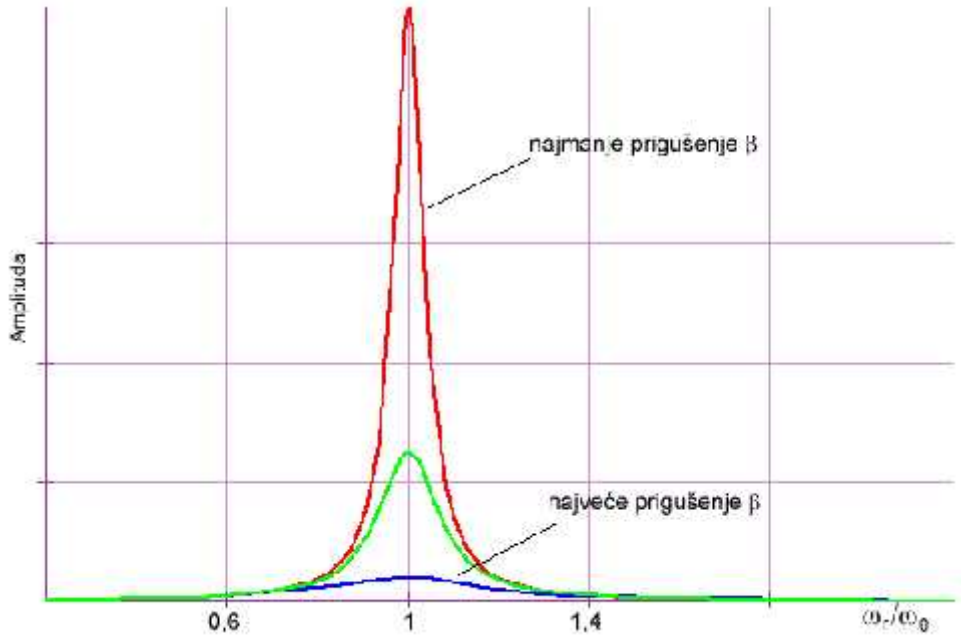
ZAKLJUČAK: Nakon što smo izveli pokus, analiziramo dobivene rezultate. Frekvencija superpozicije $(f_1 + f_2)/2)$ iznosi 412,5 Hz, a frekvencija udara $(|f_1 - f_2|)$ 55 Hz. Iščitavajući s grafa period titranja (za $n = 10$) dobivamo 20,5 ms, te računajući frekvenciju iz tog perioda, dobivamo vrijednost od 48 Hz. Neslaganje između vrijednosti koje smo dobili za frekvenciju udara se javlja radi ljudske greške; mogućnost pogreške od $\pm 1m$. Frekvencija zvučnog udara nam ovisi o položaju gumene cijevi na glazbenoj vilici. Gumena cijev na glazbenoj vilici mijenja osnovnu frekvenciju titranja na način da svojom masom i položajem utječe na duljinu zvučnih valova a samim time i na njihovu frekvenciju.

10.1.3. Akustična rezonancija

PRIBOR: dvije glazbene vilice jednakih frekvencija (440 Hz), glazbena vilica frekvencije 512 Hz, batić, mikrofon, računalo s instaliranim Visual Analyzer-om

TEORIJSKA PODLOGA: Akustični rezonantni sustavi su tvorevine unutar kojih titra zvuk. To titranje se može pojaviti u dva oblika. Prvi oblik se pojavljuje npr. u zvučnoj bas-refleksnoj kutiji gdje masa zraka u otvoru bas-refleksa stupa u rezonanciju s elastičnošću zraka zatvorenog u samoj zvučnoj kutiji. Drugi oblik takvog titranja javlja se u obliku stojnog vala stupca zraka zatvorenog u duguljast prostor s otvorom na vrhu i osnova je konstrukcije brojnih glazbenih instrumenata.

Kada na oscilator djeluje neka vanjska sila koja ima vlastitu frekvenciju, nazivamo ju vanjska prisila, oscilator će izvoditi prisilno titranje. Prisilna frekvencija je ona frekvencija koju ima vanjska prisila, a f_0 je frekvencija koju oscilator ima bez vanjske prisile i naziva se svojstvena frekvencija. Amplituda prisilnog titranja će tada ovisiti o odnosu tih dviju frekvencija na način da što je prisilna frekvencija f bliža svojstvenoj frekvenciji f_0 , to će biti učinkovitiji prijenos energije od vanjske prisile na oscilator, odnosno toliko je veća amplituda prisilnog titranja. Pojava se naziva rezonancija, a svojstvena frekvencija rezonantna frekvencija. Jakost rezonancije ovisi o prigušenju: ako je prigušenje veće, rezonancija je slabija.

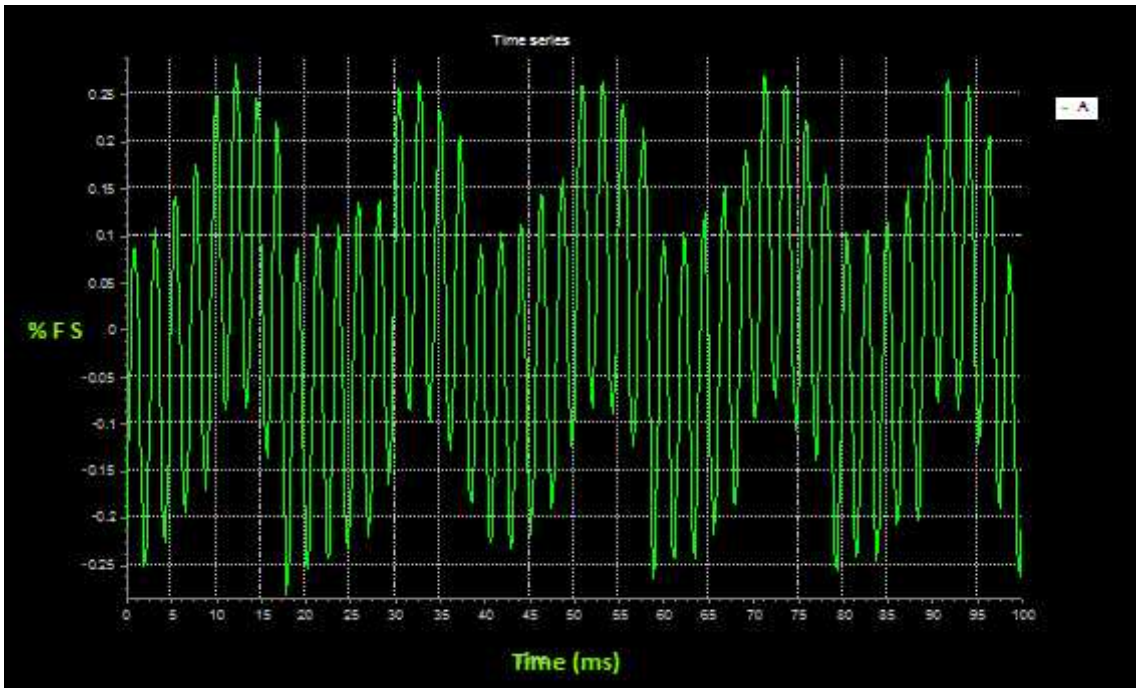


Slika 47: Amplituda prisilnog titranja. [51]

OPIS POKUSA: Dvije glazbene viljuške postavimo jednu blizu druge, na neku određenu udaljenost. Batićem udarimo prvu viljušku, a druga viljuška će se također oglasiti zvučnim titrajima. Kako bismo pobuđenu viljušku bolje čuli, prvu moramo na vrijeme prigušiti. Mikrofon postavimo u akustičnu kutiju, koja služi za pojačanje zvuka, i snimamo zvuk. Isti postupak ponovimo s jednom glazbenom viljuškom od 440 Hz i jednom od 512 Hz. Analiziramo dobivene rezultate.

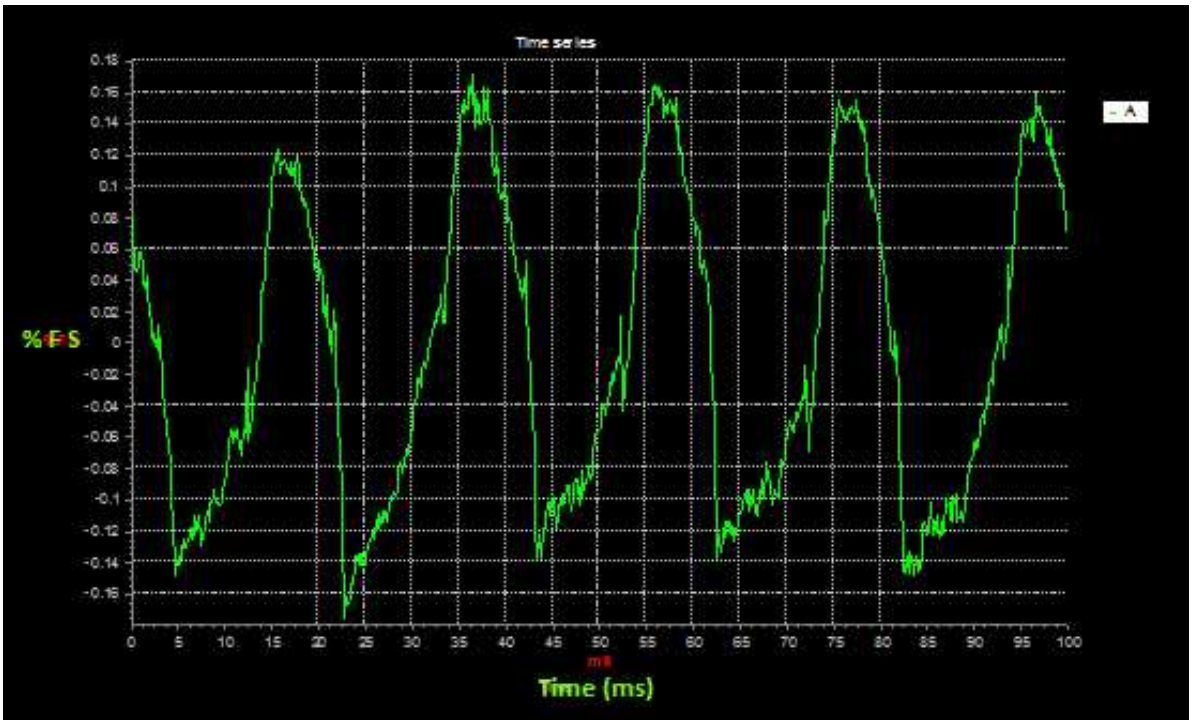
REZULTATI MJERENJA:

Dvije glazbene viljuške od 440Hz



Slika 48: Frekvencija titranja pobuđene glazbene viljuške.

Glazbena viljuška od 440 Hz i glazbena viljuška od 512 Hz



Slika 49: Frekvencija titranja pobuđene glazbene viljuške.

ZAKLJUČAK: Promatranjem dobivenih rezultata, a i računajući frekvencije, možemo zaključiti kako u prvom slučaju imamo akustičnu rezonanciju, dok u drugom nije došlo do pojave rezonancije. Do pojave rezonancije dolazi samo onda kada dva titrajna sustava imaju istu ili sličnu frekvenciju. Ukoliko nemamo glazbenu viljušku druge frekvencije, na viljušku iste frekvencije možemo staviti uteg ili plastelin, i time joj promijeniti frekvenciju.

10.1.4. Dopplerov efekt

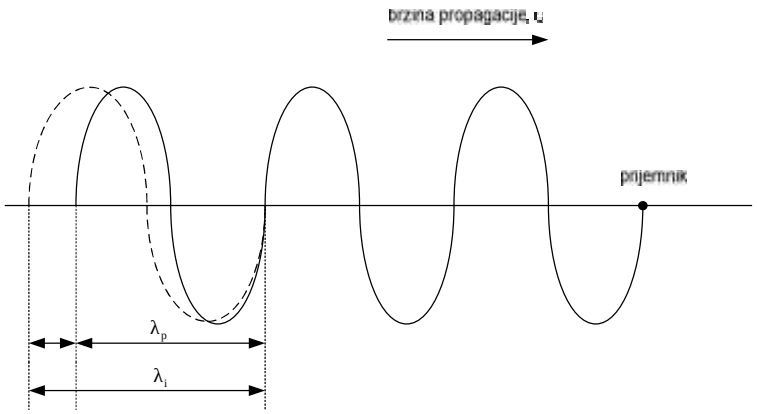
PRIBOR: izvor zvuka, mikrofon, računalo s instaliranim Visual Analyzer-om

TEORIJSKA PODLOGA: Promjena frekvencije zvuka koja nastaje zbog gibanja izvora zvuka u odnosu prema slušatelju zove se Dopplerov efekt. [3]

Kod Dopplerovog efekta možemo promatrati tri situacije.

1. Izvor zvuka miruje ($v_i = 0$) i slušatelj miruje ($v_s = 0$). Tada će frekvencija koju čuje slušatelj biti jednaka frekvenciji koju emitira izvor. $f_s = f_i$
2. Izvor zvuka se giba brzinom v_i prema mirnom slušatelju ili od njega.
   a) Izvor zvuka se približava slušatelju

- Kada se izvor zvuka giba prema slušatelju brzinom v_i , u jednoj sekundi će do slušatelja doći više valnih fronti nego kada izvor miruje, jer u tom slučaju dolazi do smanjenja valne duljine, te će slušatelj čuti višu frekvenciju nego kada izvor zvuka miruje
- $f_S = f_i \frac{v}{v - v_i}$



Slika 50: Prikaz Dopplerovog efekta kada se izvor zvuka giba prema slušatelju. [52]

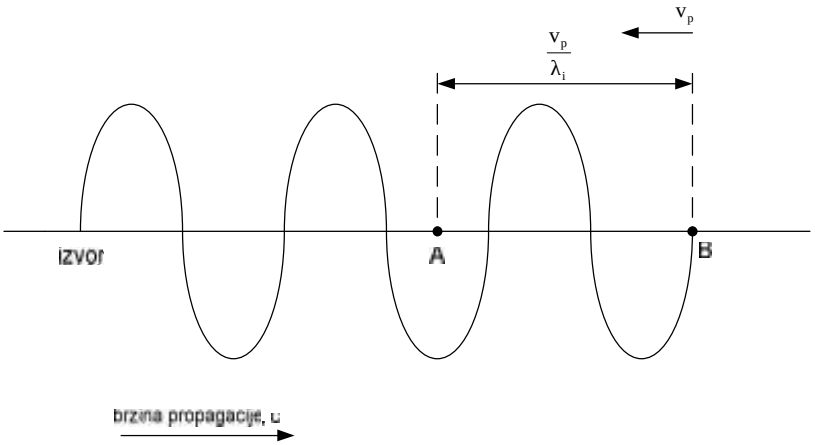
b) Izvor zvuka se udaljava od slušatelja

- Kada se izvor zvuka udaljava od slušatelja brzinom v_i, u jednoj sekundi do slušatelja stiže manje valnih fronti nego kada izvro zvuka miruje, jer je valna duljina veća, te će slušatelj čuti nižu frekvenciju
- $f_S = f_i \frac{v}{v + v_i}$

3. Slušatelj se giba brzinom v_s od izvora zvuka ili prema njemu

a) Slušatelj se približava izvoru

- Kada se slušatelj približava izvoru zvuka, do njega dolazi više valova u sekundi, te će čuti zvuk više frekvencije nego što je emitira izvor
- $f_S = f_i \frac{v + v_S}{v}$



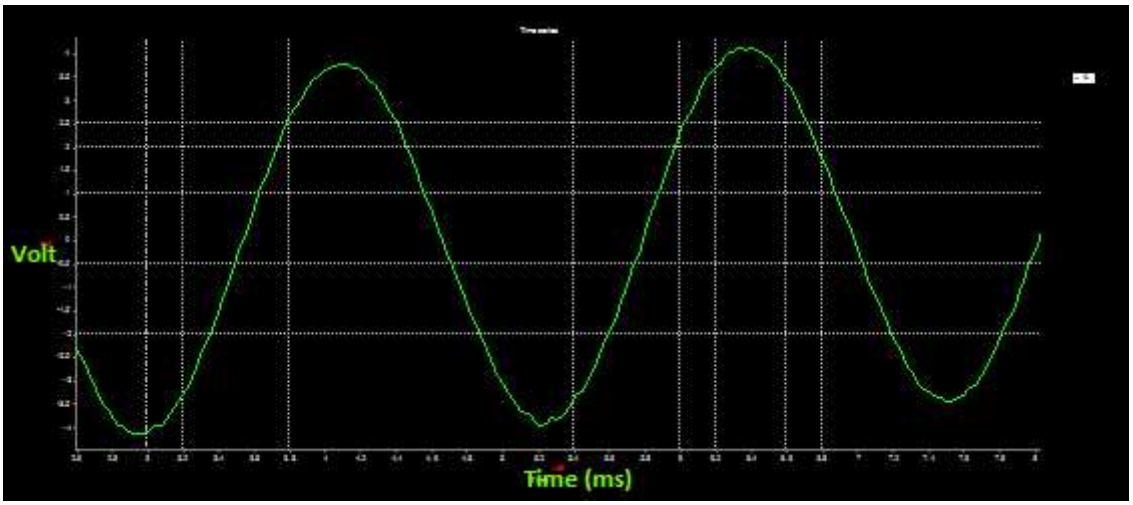
Slika 51: Prikaz Dopplerovog efekta kada se slušatelj giba u odnosu na izvor zvuka. [52]

b) Slušatelj se udaljava od izvora zvuka

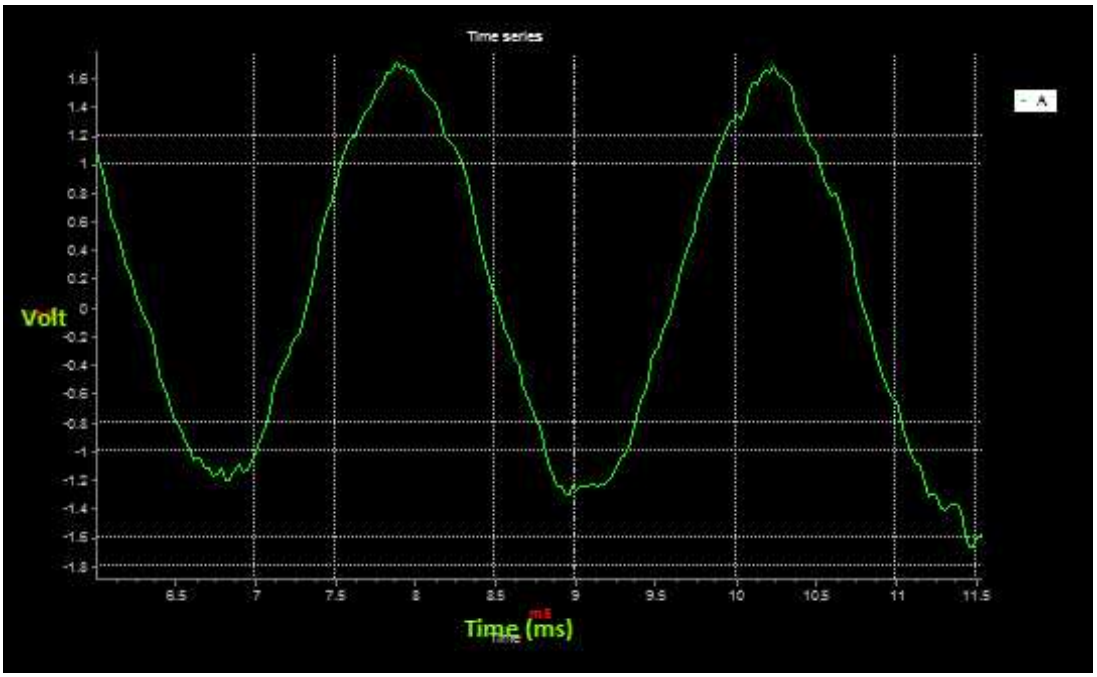
- Kada se slušatelj udaljava od izvora zvuka, do njega u sekundi stiže manje valova te zbog toga čuje zvuk niže frekvencije
- $f_S = f_i \frac{v - v_S}{v}$

Ukoliko imamo situaciju kada se gibaju i izvor zvuka i slušatelj, frekvencija koju će slušatelj čuti će biti dana izrazom: $f_S = f_i \frac{v \pm v_S}{v \mp v_i}$ U izrazu gornji predznaci vrijede u slučaju približavanja, a donji predznaci u slučaju udaljavanja. Formula se naziva Dopplerova formula.

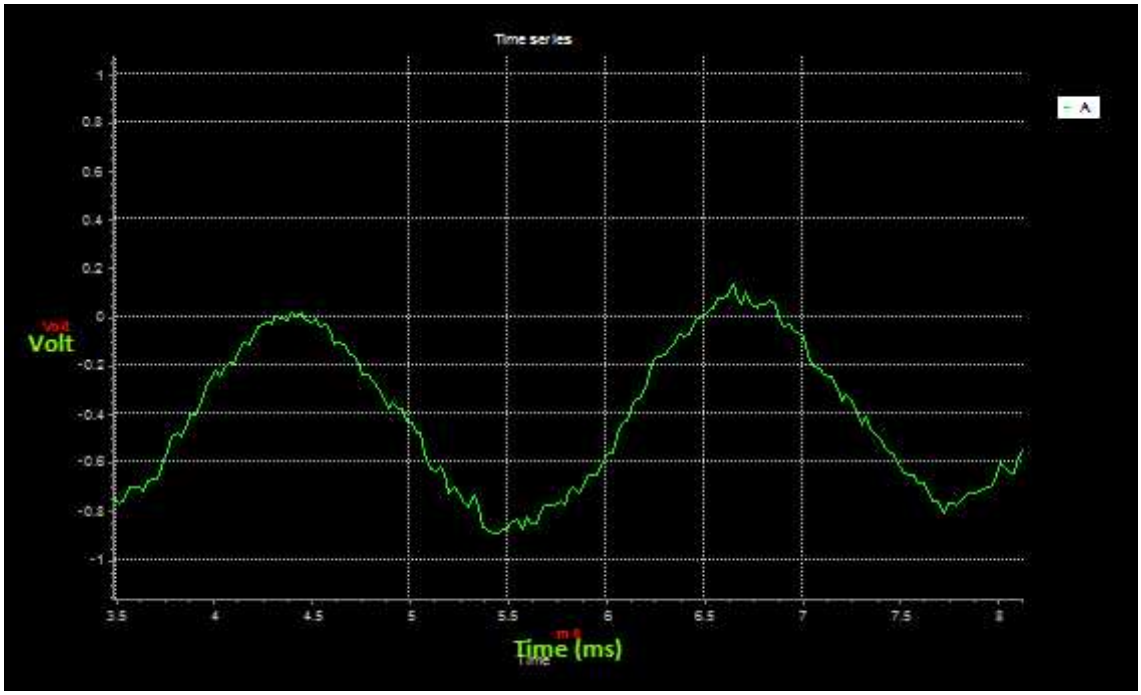
REZULTATI MJERENJA:



Slika 52: Izvor zvuka i slušatelj miruju. $f = f_0 = 442{,}48\ H$



Slika 53: Udaljavanje izvora zvuka od slušatelja. $f' = 433{,}09\ H$



Slika 54: Približavanje izvora zvuka slušatelju. $f'' = 448{,}23\ H$

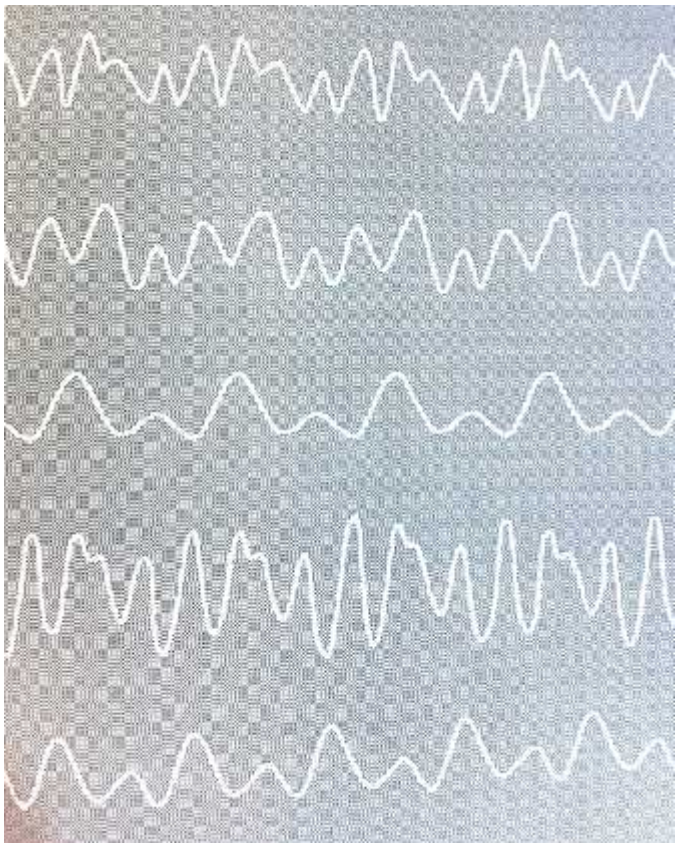
ZAKLJUČAK: Analizom dobivenih valnih oblika možemo izračunati frekvencije za sva tri slučaja, pa ćemo tako za slučaj mirovanja izvora zvuka i slušatelja dobiti za vrijednost

frekvencije 442,48 Hz (korišten izvor frekvencije 440 Hz), za slučaj kada se izvor zvuka približava slušatelju, dobivena vrijednost iznosi 448,23 Hz, te u posljednjem slučaju, kada se izvor zvuka udaljava od slušatelja frekvencija iznosi 433,09 Hz. Razlike u frekvencijama bi bile veće da su bili idealniji uvjeti za izvođenje vježbe, te da su udaljenosti prilikom približavanja i udaljavanja bile veće. U ovoj vježbi, udaljenost izvora i slušatelja je iznosila oko 90 cm. Kako program automatski snima valni oblik tijekom jedne sekunde, nije moguće prikazati zgušnjavanje odnosno razrjeđenje valnih fronti, no ipak se iz očitavanja frekvencija može steći dojam, i potvrditi Dopplerov efekt.

10.1.5. Ljudski glas kao instrument

PRIBOR: mikrofon, računalo s instaliranim Visual Analyzer-om

TEORIJSKA PODLOGA: Kao što je poznato, ljudski glas nastaje u grlu, gdje glasnice uzrokuju titranje zraka. Glasnice se sastoje od dvaju nabora između kojih prolazi zrak. Na tim naborima su napete tisuće elastičnih poprečnih vlakana. Kada se nabori stisnu, napeta vlakna titraju pri prolasku zraka na način koji možemo usporediti s titranjem žice jer frekvencija približno ovisi o duljini i napetosti vlakna. Mijenjanjem napetosti glasnica se mijenja i frekvencija i udio viših harmonika. Na slici 55 je prikazan valni oblik svih samoglasnika.

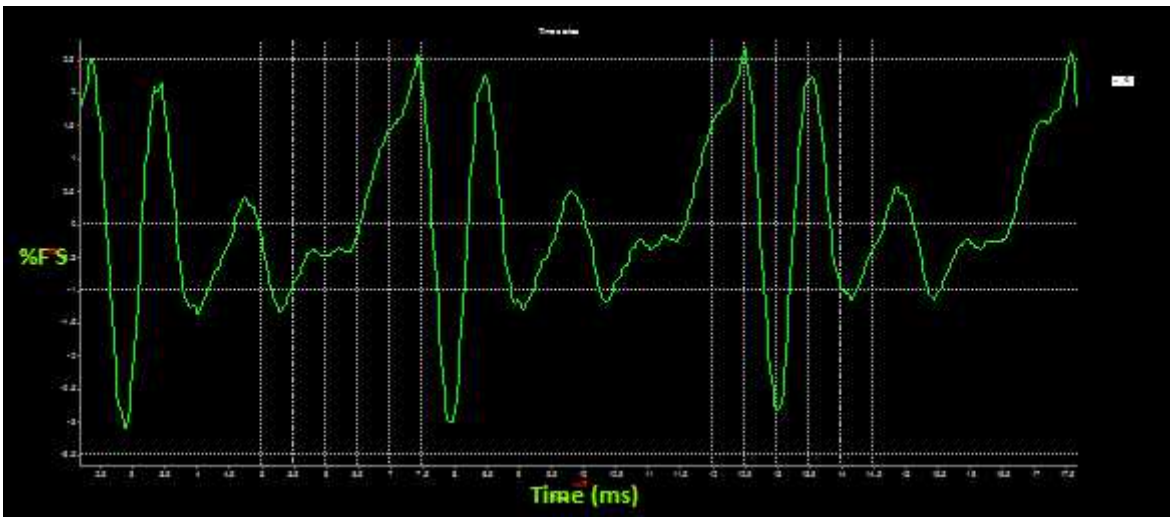


Slika 55: Valni oblik samoglasnika „A“, „E“, „I“, „O“, „U“. [55]

OPIS POKUSA: Jednakom jačinom glasa izgovaramo npr. samoglasnike, snimamo valne oblike istih, te ih kasnije analiziramo.

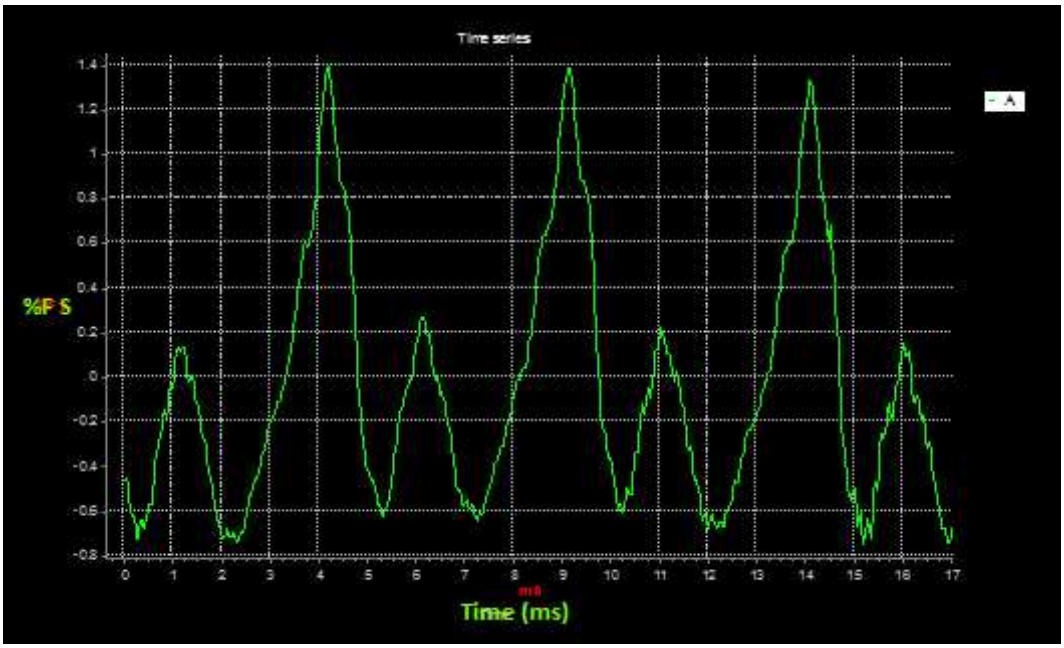
REZULTATI MJERENJA:

Samoglasnik „A“:



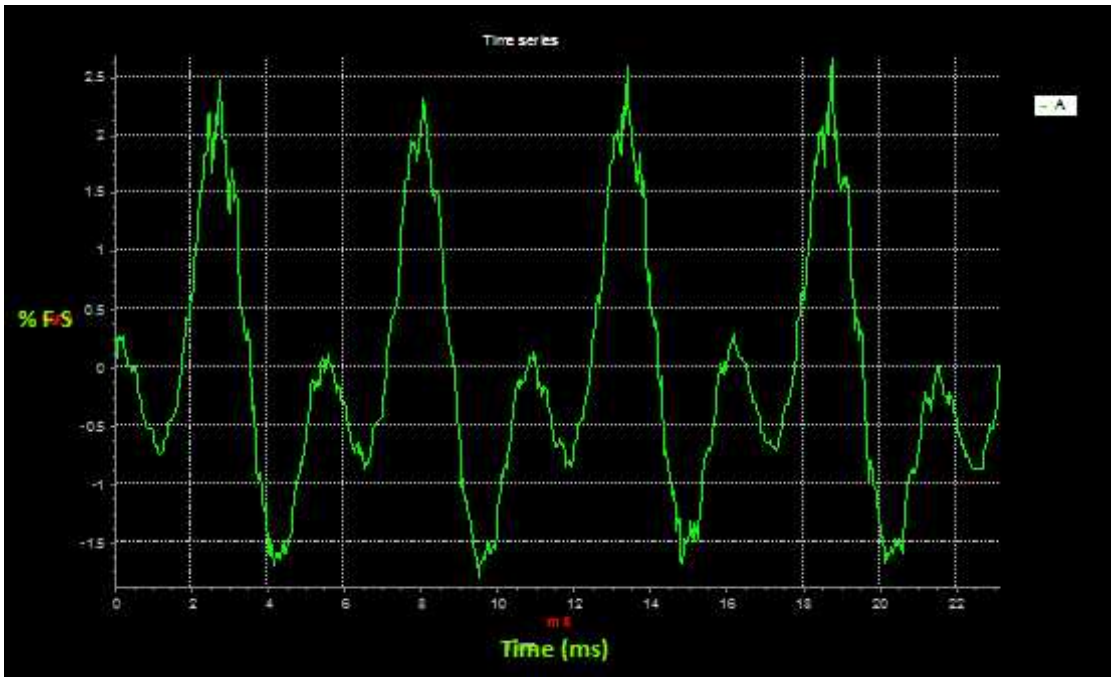
Slika 56: Valni oblik samoglasnika „A“.

Samoglasnik „E“:



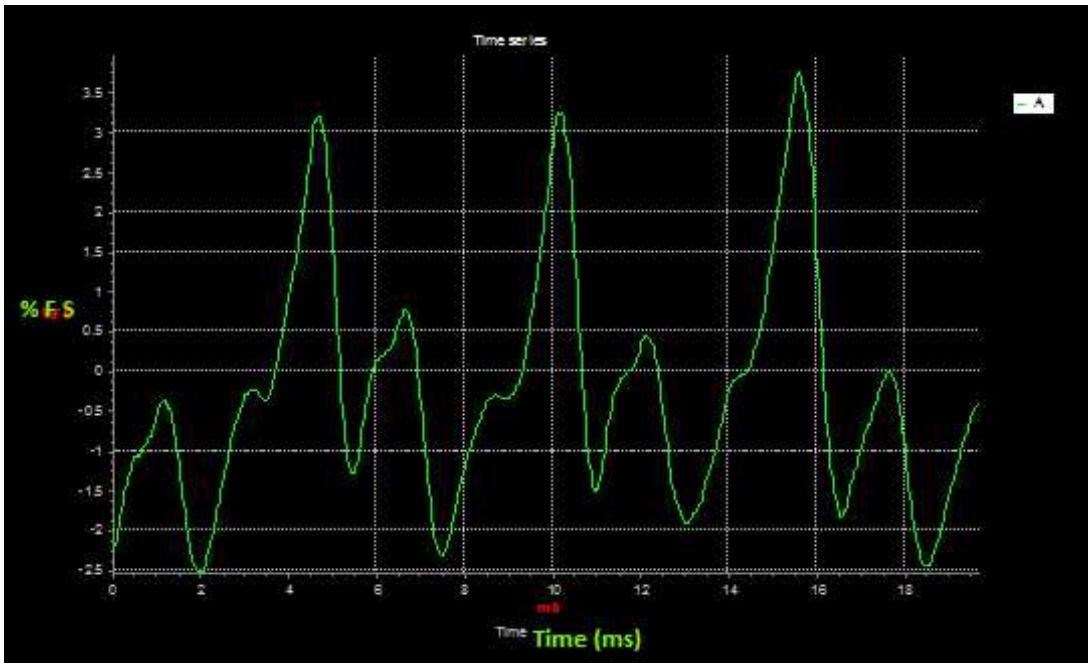
Slika 57: Valni oblik samoglasnika „E“.

Samoglasnik „I“:



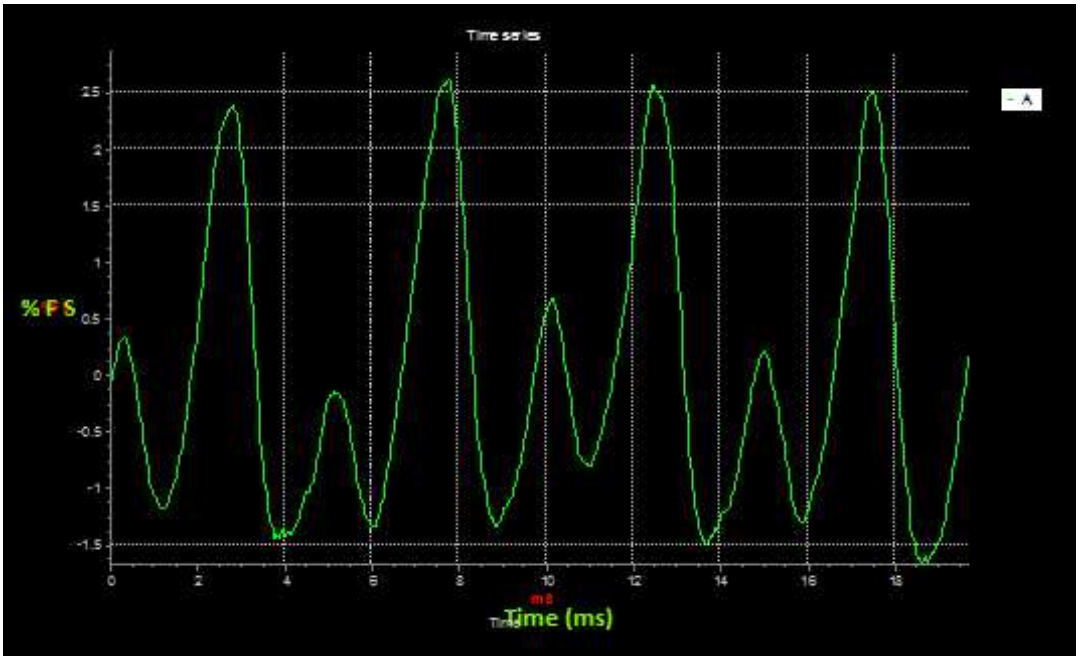
Slika 58: Valni oblik samoglasnika „I“.

Samoglasnik „O“:



Slika 59: Valni oblik samoglasnika „O“.

Samoglasnik „U“:



Slika 60: Valni oblik samoglasnika „U“.

ZAKLJUČAK: Analizom dobivenih valnih oblika za sve samoglasnike, izračunali smo frekvenciju koja odgovara pojedinom samoglasniku. Tako samoglasniku *a* odgovara frekvencija od 196,08, samoglasniku *e* 208,33 Hz, samoglasniku *i* 192,31 Hz, samoglasniku *o*

181,82 Hz, te samoglasniku *u* 212,77 Hz. Ove frekvencije ovise o napetosti glasnica i mogu se mijenjati. No ono što se ne mijenja je oblik vala koji je karakterističan za svaki pojedini samoglasnik. Ovime smo pokazali kako bez obzira što svi izgovoreni samoglasnici dolaze od iste osobe, svaki samoglasnik ima svoj karakteristični valni oblik. Različiti valni oblici se javljaju zbog različitog oblika usne šupljine (rezonantne kutije) pri izgovaranju različitih samoglasnika. Oblik usne šupljine (rezonantne kutije) utjecat će na to koji viši harmonici će biti pobuđeni te kakav će biti oblik vala, a time i boja glasa.

10.2. Vježbe

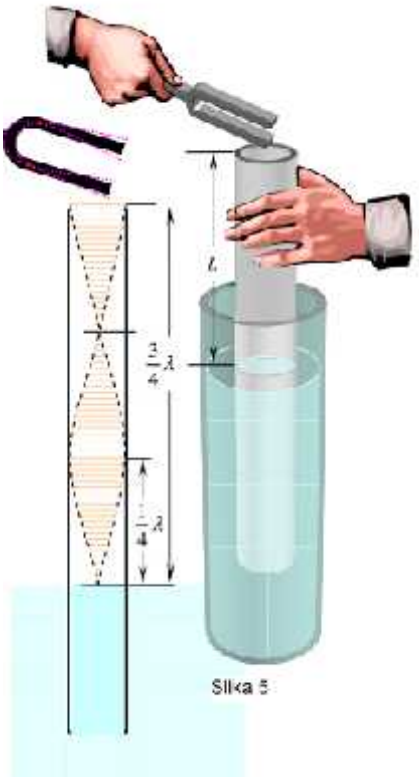
U sljedećem dijelu je navedeno nekoliko pokusa koji se mogu upotrijebiti za demonstracije različitih pojava iz područja fizike, ali i iz svakodnevnog života.

10.2.1. Određivanje frekvencije glazbene viljuške

PRIBOR: batić, glazbena viljuška, staklena cijev, posuda s vodom, mikrofon, računalo s instaliranim Visual Analyzer-om

OPIS POKUSA: Glazbenu viljušku udarimo batićem da zatitra i stavimo ju iznad staklene cijevi uronjene u posudu s vodom. Dižemo i spuštamo staklenu cijev, čime mijenjamo razinu vode u cijevi, odnosno povećavamo ili smanjujemo visinu stupca zraka u dijelu cijevi iznad vode. Kod određene duljine stupca zraka u cijevi se čuje glasniji ton, i taj ton snimimo program. Pomičemo cijev gore dolje i snimamo valni oblik svih tonova kod kojih čujemo da su glasniji. Koliko će biti takvih tonova, ovisi o duljini staklene cijevi. Ukoliko nam je poznata točna frekvencija glazbene viljuške, ovim pokusom možemo određivati i brzinu zvuka, prema izrazu: $v = \lambda \cdot f = 4L \cdot f$; uz dani izraz: $L = (2n - 1)\frac{\lambda}{4}$ gdje *L* samo teoretski odgovara točno četvrtini valne duljine i to za cijev beskonačno malog promjera.

Na 0□ brzina zvuka iznosi oko 331,6 m/s, te se na drugim temperaturama ona izračunava prema relaciji: $v_t = v_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{t[\square]}{2\ ,1}}$



Slika 61: Određivanje frekvencije glazbene viljuške. [50]

10.2.2. Određivanje frekvencije gradske mreže i oblik signala

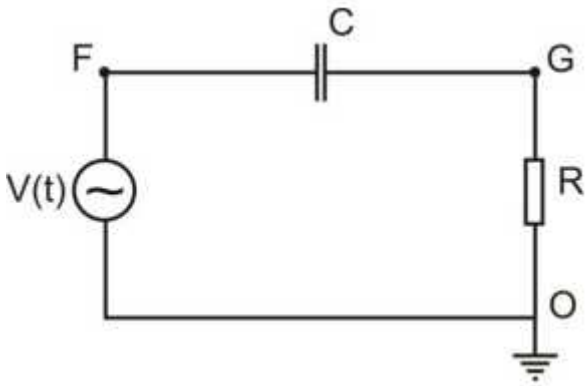
PRIBOR: računalo s instaliranim Visual Analyzer-om, spojni vodovi, transformator 220V/2V, generator sinusnih titraja

OPIS POKUSA: Na osciloskopu prvo napravimo kalibraciju, kako bismo mogli mjeriti vremenske intervale. Osim vremenskih intervala, promatrat ćemo i mjeriti frekvenciju napona gradske mreže sniženog preko transformatora na 2V. Inače, kod programa Visual Analyzer se ne preporuča korištenje većeg napona, kako ne bi došlo do oštećenja samog računala. Granica je postavljena na oko 2V. Vertikalno pojačanje namjestimo tako da nam je ulazni signal dobro vidljiv, odredimo frekvenciju gradske mreže iz slike izmjeničnog napona iste koju smo dobili na ekranu, te također možemo odrediti frekvenciju nekog sinusnog vala iz generatora signala i provjeriti dobivenu vrijednost s vrijednošću na skali generatora.

10.2.3. Osciloskop i RC krug

PRIBOR: izvor izmjeničnog napona, otpornik, kondenzator, računalo s instaliranim Visual Analyzero-om, spojni vodovi

OPIS POSTUPKA: Sastavimo RC sklop u krugu s izmjeničnom strujom. Pazimo da nam napon ne prelazi 2V, kako ne bi došlo do oštećenja računala. Promatramo napon izvora i napon na krajevima otpornika. Osciloskopom mjerimo period, amplitude napona te njihov fazni pomak. Pogledamo *XY* prikaz signala. Kao shemu, u nedostatku bolje, možemo se poslužiti dolje navedenom.



Slika 62: Shema za sklop RC u krugu s izmjeničnim naponom. [41]

11. Zaključak

Vizualizacija akustičnih pojava kao dio procesa za usvajanje novih znanja učenika u nastavi fizike, ima veliku prednost, jer se njome postiže lakše razumijevanje akustičnih fenomena i razvoj vlastitih spoznaja o njima.

Tradicionalne metode koje su se primjenjivale u nastavi fizike su se zasnivale na mogućnostima mehaničke interpretacije učinaka zvučnih valova, uz korištenje mehaničkih i optičkih uređaja. Razvojem tehnologije, sam proces proučavanja tih pojava se diže na jednu novu razinu i omogućava još bolji uvid u razne fizikalne fenomene.

Kako bi se iskoristile te prednosti tehnologije u nastavi fizike, u radu sam objasnila na programu Visual Analyzer nekoliko demonstracijskih pokusa, i dokazala kako i računalo kao osciloskop može biti nadasve korisno prilikom uvođenja učenika u nova područja fizike, te objašnjavanje istih. Ovaj program prije svega može biti velika prednost školama koje ne posjeduju analogni osciloskop, ali i svima ostalima koji se žele baviti znanošću, bilo amaterski ili u neke znanstvene svrhe. Osim što posjeduje veliki broj funkcija kojima se mogu analizirati pojave, prednost je ta što je program besplatan i lako dostupan svima.

U radu su demonstracijske vježbe orijentirane na akustiku, no osim nje, može se primjenjivati i u elektricitetu i magnetizmu.

12. Literatura

[1] Bego Vojislav, Mjerenja u Elektrotehnici, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.godina

[2] Mlakar France, Opća električna mjerenja-1.dio

[3] Paar Vladimir, Fizika 3, udžbenik za treći razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2005.

[4] http://www.ameerkabob.com/article/povijest-osciloskopi.html (17.3.2015.)

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope_history (20.5.2015.)

[6] http://vtsbj.hr/images/uploads/MUM_P18.pdf (10.3.2015.)

[7] http://moodle.oss.unist.hr/mod/resource/view.php?id=14376 (13.3.2015.)

[8]http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=66921 (13.3.2015.)

[9]http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/katedre/konstruiranje/kolegiji/BLab/BLab_info_files/BLab_materijali/Osciloskop.pdf (14.3.2015.)

[10]http://oss.unist.hr/~mnizetic/ELEKTRONICKI%20SKLOPOVI/(Microsoft%20Word%20-%20Upotreba%20osciloskopa%20za%20mjerenja).pdf (22.4.2015.)

[11]http://www.tehnicka-skola-karlovac.hr/maturalna_pitanja/2_17schmitov_okidni_sklop.php (27.4.2015.)

[12]https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/286300/mod_resource/content/1/Laboratorijske_vjezbe/Predlosci/Lv5_-_Schmitt.pdf (11.5.2015.)

[13]http://vtsbj.hr/images/uploads/MUM_P18.pdf (10.3.2015.)

[14]http://vtsbj.hr/images/uploads/P9_MUM_2013_14_Osciloskop.pdf (20.5.2015.)

[15]https://muricmilorad.files.wordpress.com/2012/01/osciloskopi.pdf (2.5.2015.)

[16]http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/osciloskop.pdf (2.5.2015.)

[17]http://spvp.zesoi.fer.hr/seminari/2007/seminari/NikolaBradac_osciloskop.pdf (17.4.2015.)

[18]http://osciloskopi.weebly.com/digitalni-osciloskopi.html (28.5.2015.)

[19]http://os-zakanje.skole.hr/upload/os-zakanje/images/multistatic/52/File/6_razred/Audio%20formati%20i%20kvaliteta%20zapisa.pdf (8.6.2015.)

[20]http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/45-11/soundcard.html (7.6.2015.)

[21]http://electronicdesign.com/4g/vco-transforms-sound-card-precision-dc-coupled-adc (8.6.2015.)

[22]http://ahyco.uniri.hr/Seminari2008/Gradja_racunala/periferni2-5.html (10.6.2015.)
[23]http://elektronika.jazbina.com/stari%20sajt/185%20-%20prakt%20racunara/vezba%206/Reporodukcija.pdf (10.6.2015.)
[24]https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/06_AD_i_DA_pretvaraci_i_zvucne_kartice_v2.pdf (10.6.2015.)
[25]http://www.zen22142.zen.co.uk/Prac/winscope.htm (11.6.2015.)
[26]http://www.zeitnitz.eu/scope_en (11.6.2015.)
[27]http://www.sillanumsoft.org/ (12.6.2015.)
[28]http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/diplome/drad_ivan_lesic.pdf (7.6.2015.)
[29]http://www.hitsquad.com/smm/programs/VA/ (7.6.2015.)
[30]ftp://ftp.cmpe.emu.edu.tr/COURSES/CMPE108/Fortran%2095/MANUALS/Visual_Analyzer.pdf (7.6.2015.)
[31]http://www.mcgee-flutes.com/Visual_Analyser-Calibration.htm (17.6.2015.)
[32]http://nastavna-sekcija.hfd.hr/wp-content/uploads/2015/03/Pokusi-s-glazbenim-vilicam1.pdf (20.6.2015.)
[33]https://element.hr/artikli/file/1605 (22.6.2015.)
[34]https://hr.wikipedia.org/wiki/Amplituda (22.6.2015.)
[35]http://vdjerek.net/stty/analiza%20zvuka%20v2.pdf (15.6.2015.)
[36]http://physics.mef.hr/Praktikum/opticka_resetka/interferencija.htm (22.6.2015.)
[37]https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCIQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.pmfst.unist.hr%2F~luketin%2FIntroInPhys%2FZvuk%2FZvuk.ppt&ei=CiyJVaJcobbKA4Sok8gD&usg=AFQjCNGacuOG2E7nsYRkyrv4kEzHLf9Q3g&sig2=kbciTlIVBXBNEQOm02_pUg (22.6.2015.)
[38]http://www.unidu.hr/unidu/enus/Dopplerov%20efekt_2.doc
[39]http://www.phy.pmf.unizg.hr/~ana/praktikum/4_4.pdf (20.6.2015.)
[40]http://www.phy.pmf.unizg.hr/~ana/praktikum/3_4.pdf (20.6.2015.)
[41]http://www.phy.pmf.unizg.hr/~gorjana/nastava/Praktikum/Fizicki%20praktikum%201/vjezbe%20i%20upute/Vjezba4.pdf (21.6.2015.)
[42]http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray_tube Preuzeto: 22.5.2015.
[43](http://www.ohsu.edu/xd/research/centers-institutes/vollum/about/images/vollum_murdoch_1.jpg) Preuzeto: 22.5.2015.

[44]http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4802L/f05/lectures/oscilloscope.pdf) Preuzeto: 22.5.2015.

[45]https://www.maturski.org/INFORMACIONI%20SISTEMI/pictures/Zvucni%20podsustav.jpg) Preuzeto: 8.6.2015.

[46] (http://thumbs4.picclick.com/d/w225/pict/390824912335.jpg) Preuzeto: 10.6.2015.

[47](http://www.creative.com/emu/images/product/large/201131594229633_prod_1616MPCIe.png) Preuzeto: 10.6.2015.

[48](http://physics.mef.hr/Predavanja/zvucnival/slike/sirenjezvuka.gif) Preuzeto: 22.6.2015.

[49](http://dominis.phy.hr/~hmikulec/SAMP/seminar2/slika1.jpg) Preuzeto: 20.6.2015.

[50](http://nastavna-sekcija.hfd.hr/wp-content/uploads/2015/03/Pokusi-s-glazbenim-vilicam1.pdf) Preuzeto: 20.6.2015.

[51](http://physics.mef.hr/Predavanja/titranje/slike/prisilno.gif) Preuzeto: 23.6.2015.

[52](http://www.unidu.hr/unidu/enus/Dopplerov%20efekt_2.doc) Preuzeto: 23.6.2015

[53]http://www.pmfst.unist.hr/~santon/OE23.pdf (6.7.2015.)

[54]Hemenway C., Henry R., Caulton M., Fizička elektronika, Beograd 1974. (8.7.2015.)

[55]Stanić D., Valovi i glazba (9.7.2015.)

[56]https://en.wikipedia.org/wiki/Beat_(acoustics) (10.7.2015.)

[57]http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/sumdif.html#c1 (10.7.2015.)

13. Životopis

Rođena sam 12.lipnja 1988. godine u Vinkovcima. Osnovnu škola Antunovac sam završila u Antunovcu, nakon čega upisujem Opću gimnaziju u Osijeku. Po završetku srednje škole, 2007.godinem upisujem se kao redovita studentica na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, koji je u sastavu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. 2012. Godine, nakon završetka preddiplomskog studija, upisala sam Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku.