

## 56. srečanje mladih raziskovalcev Slovenije

### Seciranje električne kitare

*Analiza lastnosti RC filtra in njegov vpliv na zvok električne kitare*

Raziskovalno področje: Fizika

Raziskovalna naloga

Avtorja: Žiga Bele in Gašper Drev

Mentor: dr. Marko Jagodič

Šola: II. gimnazija Maribor

2022, Maribor



## 1. Povzetek

---

V raziskovalni nalogi sva preučila fizikalne lastnosti RC filtra kitare, ki je odvisen od upornosti, ki jo lahko nastavljamo z *tone controlom* in od frekvenc izmeničnega toka, ki ga inducira kitarski magnet. Da bi najina predvidevanja potrdila, oz. ovrгла, sva najprej izmerila upornost potenciometra na vseh njegovih nastavitvah, ki je v RC filtru, nato pa sva opravila še 4 eksperimente, pri katerih sva merila signal na izhodu električne kitare in signal na magnetu. Pri meritvah sva opazovala spreminjanje amplitude višjih harmonikov v odvisnosti od upora RC filtra in meritve primerjala med sabo. O tej temi je sicer napisane veliko literature, a je večina napisana le za področje elektrotehnike, v povezavi z glasbo pa se to znanje uporablja zgolj v tovarnah kitar. Na podlagi najinih eksperimentov in rezultatov bi lahko s praktičnim primerom glasbenikom razložila delovanje RC filtra in jim tako razširila možnosti uporabe in izboljšav le-tega. Z rezultati sva vse pričakovane ugotovitve potrdila, prav tako se rezultati ujemajo s podatki iz literature, torej so najine meritve natančne.

Ključne besede: električna kitara, RC filter, barva zvoka, višji harmoniki

Angleški prevod:

In the research paper, we examined the physical properties of the RC filter of a guitar, which depends on the resistance that can be adjusted with tone control and on the AC frequencies induced by the guitar magnet. In order to confirm our predictions, we first measured the resistance of the potentiometer which is in the RC filter at all its settings, and then we performed 4 more experiments in which we measured the signal at the output of the electric guitar and the signal on the magnet. In the measurements, we observed the change in the amplitude of the higher harmonics depending on the resistance of the RC filter and compared the measurements with each other. Much literature has been written on this subject, but most has been written only in the field of electrical engineering, and in connection with music this knowledge is used only in guitar factories. Based on our experiments and results, we could use a practical example to explain to musicians the operation of the RC filter and thus expand the possibilities of using and improving it.

Key words: electric guitar, RC filter, sound color, higher harmonics



## KAZALO VSEBINE

1. POVZETEK	2
ZAHVALA	10
<b>2. Uvod</b>	1
<b>2.1. Električna kitara</b>	1
2.1.1. Poimenovanje	1
2.1.2. Izum električne kitare	1
2.1.3. Zgradba električne kitare	2
2.1.4. Vezje v električni kitari	3
<b>2.2. Zvok in barva zvoka</b>	7
2.3. Raziskovalno vprašanje	8
2.4. Cilji raziskovalne naloge	9
2.5. Raziskovalne metode	9
2.5.1. Seznam uporabljene opreme	9
2.5.2. Način pridobivanja rezultatov	9
2.5.3. FFT – Hitra Fourierjeva transformacija	10
2.6. Predvideni rezultati	11
<b>3. REZULTATI IN IZRAČUNI</b>	13
3.1. Predstavitev rezultatov	13



3.2.	Meritev opravljena na magnetu	13
3.3.	Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 10	15
3.4.	Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 5	17
3.5.	Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 0	20
4.	RAZPRAVA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV	23
4.1.	Možne napake pri merjenju	25
4.2.	Družbena odgovornost	25
5.	ZAKLJUČEK	26
6.	BIBLIOGRAFIJA	27





## KAZALO SLIK

Slika 1: Shema vezja v električni kitari (Malaker, 2018)	4
Slika 2: Frekvenčni potek napetosti na uporniku RC delilnika, pri katerem gre signal najprej skozi kondenzator (Žalar, 2005)	6
Slika 3: Valovanje z isto osnovno frekvenco različnih virov zvoka (Rajgelj, 2022)	8
Slika 4: Prikaz delovanja FFT za nihanje sestavljeno iz treh različnih sinusnih nihanj. (Fast Fourier Transformation FFT - Basics, 2022)	11
Slika 5: lastna frekvenca 440 Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena na magnetu	13
Slika 6: upornost potenciometra v RC filtru pri različnih nastavitvah, kot so označene na kitari	14
Slika 7: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 10	15
Slika 8: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 10 ( $R=16\ \Omega$ )	16
Slika 9: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 10 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 10	17
Slika 10: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 5	17
Slika 11: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 5 ( $R=360000\ \Omega$ )	18
Slika 12: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 5 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 5	19



Slika 13: lastna frekvenca 440 Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 0	20
Slika 14: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 5 ( $R=360000 \Omega$ ) 21 Slika 15: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 0 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 0	22
Slika 16: Preimerjava izračunanih srednjih vrednosti izhodne amplitude lastne frekvence in prvih dveh višjih harmonikov pri treh merjenih nastavitvah tone controla	22
Slika 17: Preimerjava izmerjenih srednjih vrednosti izhodne amplitude lastne frekvence in prvih dveh višjih harmonikov pri treh merjenih nastavitvah tone controla	23
Slika 18: ločen prikaz sestavnih delov sinusnega valovanja. (Nihanje strune, 2004)	25



## **Zahvala**

---

Rada bi se zahvalila svojemu mentorju za vso pomoč ob opravljanju eksperimentov, in pri pisanju naloge. Med pisanjem raziskovalne naloge nama je nudil podporo in vodstvo. Rada bi se zahvalila tudi šoli, ki nama je omogočila opravljanje raziskovalne naloge z vso potrebno opremo.



## 2. Uvod

---

Za raziskovalno nalogo v povezavi s kitaro, njenimi strunami in njenimi električnimi komponentami sva se skupaj z mentorjem odločila, saj smo vsi ljubitelji glasbe, fizike in igranja kitare. Želeli smo ugotoviti, zakaj kitara zveni kot kitara. Obema se zdi zanimivo, kako je za še tako preprostimi stvarmi iz vsakdanjega življenja kompleksno znanstveno ozadje, ki ga s pomočjo fizike lahko raziščeva. Med raziskovanjem sva se želela naučiti tudi novih raziskovalnih tehnik in načinov obdelovanja podatkov, ki nama bodo koristili tudi na najini poklicni poti.

### 2.1. Električna kitara

#### 2.1.1. Poimenovanje

Med slovenskimi kitaristi se za RC filter oz. gumb za barvo zvoka in za delilnik napetosti oz. gumb za glasnost zvoka (opisana sta v poglavju 3.1.4.) uporabljata angleška izraza: *tone control* za prvega in *volume control* za drugega, zato bova med pisanjem raziskovalne naloge uporabila angleške izraze. Za izhodno komponento vezja, kamor se v kitaro priključi kabel (angleško *output jack*), bova uporabila izraz *izhod (kitare)*, za kitarske magnetne (angleško *pickups*) pa izraz *magneti*. Za te izraze sva se odločila, ker se nama zdijo enostavnejši za razumevanje in ker jih v svojem žargonu uporabljajo tudi kitaristi.

#### 2.1.2. Izum električne kitare

Že pred izumom električne kitare je bila kitara eden izmed pomembnejših inštrumentov na zahodni glasbeni sceni, vendar pa je bila večinoma zgolj podporni inštrument, saj je glasnost akustične kitare v primerjavi z drugimi glasbili majhna. Glasbeniki so zaradi tega želeli povečati glasnost in opaznost svojega inštrumenta. Kitaristi so na svoja glasbila dodajali več pripomočkov, žic in naprav, ki naj bi povečali glasnost kitare, šele v tridesetih letih prejšnjega stoletja pa je električna kitara postala ločena od akustične, kar je pripomogli tudi k širjenju in napredovanju glasbenih žanrov, kot sta jazz in blues. Prvo električno kitaro naj bi izumil Paul H. Tutmarc, ki ga je navdihnili vezje telefona. Na havajsko kitaro je pripel magnet, ki ga je naredil iz kopitnega magneta in žic. V istem času sta George Beauchamp in John Dopyera eksperimentirala z ojačevalnimi rogovi na inštrumentih, kasneje pa prav tako sestavila elektromagnetni kitarski magnet, ki je bil sestavljen iz dveh kopitnih magnetov. Zadovoljna z rezultatom sta naročila izdelavo kitare, ki bi bila prilagojena za dodajanje magneta. Beauchamp

je ta prototip predstavil Adolphu Rickenbackerju, s katerim sta ustanovila podjetje in postala prva izdelovalca električnih kitar. Prve električne verzije klasične kitare je izumil in prodajal Lloyd Loar in z njimi navdušil pionirja Orvillea Gibsona, ki je s svojimi sodelavci dokončal prvi prototip moderne električne kitare. Z magneti so ojačali vibracije znotraj votlega trupa kitare, kar pa je hitro povzročilo hreščanje, saj je ojačan zvok kitare povzročil vibracije trupa in se tako ponovno ojačal, kar je vodilo v vedno glasnejše piskanje. Ta problem je rešil Les Paul, ki je izdelal prvo kitaro s polnim trupom. Gibson je bil sprva skeptičen, zato je Les Paulov dizajn uporabil Leo Fender in začel prodajati Esquire, kasneje imenovano Telecaster, kar je še zdaj eden izmed prepoznavnejših modelov kitare. Gibson je kasneje izdal svoj slavni model, ki se je po pionirju imenoval Les Paul (Harvey, 2022).

### 2.1.3. Zgradba električne kitare

Večina električnih kitar ima poln trup, ki je tanjši in včasih tudi manjši od trupa akustičnih kitar. Večinoma so narejene iz lesa, vendar material, iz katerega so izdelane, nima velikega vpliva na zvok in delovanje inštrumenta. George Beauchamp, eden izmed prvih, ki so izdelali električno kitaro, pravi, da je lahko trup kitare različnih oblik in velikosti ter narejen iz različnih materialov, ne da bi to vplivalo na pristnost in delovanje brenkala. Velikega vpliva prej omenjene lastnosti nimajo, saj trup kitare nima velike vloge pri generiranju in ojačevanju zvoka. Ogrodje inštrumenta ima zlasti vlogo držala za strune, ki morajo biti dovolj dolge in dovolj napete, da nihajo s frekvencami, ki so uporabne v glasbi. Kljub temu da resonančnost inštrumentovega trupa vpliva na barvo zvoka, saj se pri različnih materialih resonanca pojavi pri različnih frekvencah (višjih harmonikih tona, kar podrobneje razloživa v poglavju "Zvok in barva zvoka", je zvok električne kitare ustvarjen na popolnoma drugačen način, kot pri akustični kitari, zato sta, kljub podobnemu načinu igranja in podobnemu izgledu, akustična in električna kitara dve zelo različni brenkali (Woodford, 2022).

Zvok električne kitare je ustvarjen s pojavom, pri katerem s spremembami v magnetnem polju nastane napetost in magnetno polje in ga imenujemo magnetna indukcija. Napetost, ki nastane pri tem pojavu, je inducirana napetost, nastali električni tok pa inducirani tok (Kladnik & Kodba, 2019).

Indukcija je odvisna od magnetnega pretoka. Ta je produkt gostote magnetnega polja (oznaka  $B$ ) in površine, ki je pravokotna na silnice gostote magnetnega polja, ki jo prebadajo (oznaka  $S$ ). Napetost in tok se inducirata, ko se vodnik v magnetnem polju premika in posledično



spreminja magnetni pretok oz. število silnic gostote magnetnega polja, ki prebadajo površino vodnika. Če se število silnic povečuje, tok teče v eno smer, če se zmanjšuje, pa v drugo smer (Kladnik & Kodba, 2019).

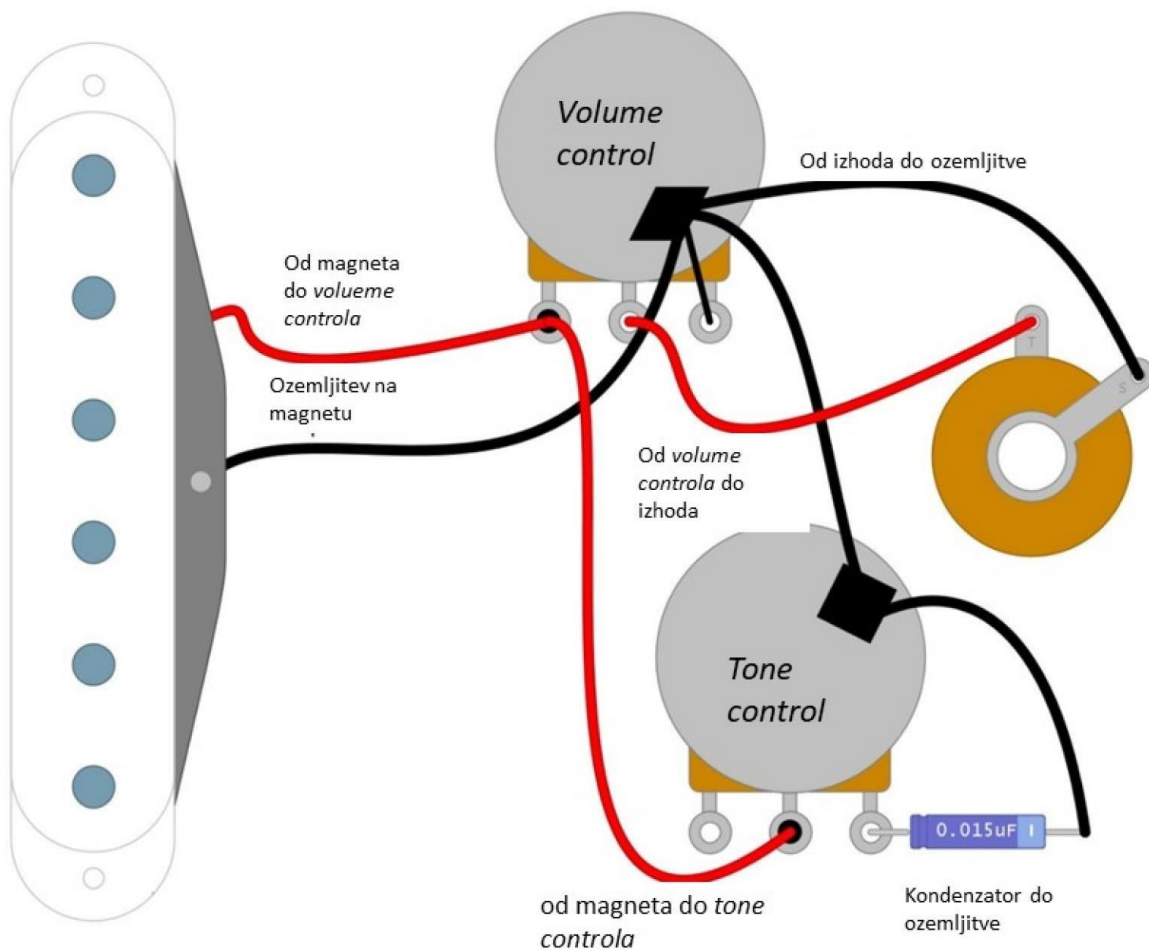
Pod strunami električne kitare so nameščeni kitarski magneti. Ti so sestavljeni iz enega ali več magnetov, ki so oviti v več sto ali več tisoč ovojev bakrene žice, kar tvori tuljavo. Magnetno polje magnetov delno magnetizira kovinske strune. Ko strune zanihajo, se magnetni pretok skozi strune spreminja, kar inducira majhno napetost v bakreni žici, oviti okoli magnetov. Ko se struna med nihanjem oddalji od magneta, se magnetni pretok zmanjša, ko se magnetu približa, se magnetni pretok poveča, kar pomeni, da nastane izmenični tok, katerega frekvenca je enaka frekvenci, s katero struna niha. Konca tuljave, ki ovija magnet, sta nato speljana skozi trup kitare do vezja in nato iz vezja skozi kabel, ki povezuje kitaro z ojačevalcem, ki njen signal ojača (Woodford, 2022).

Enostavni magneti, pri katerih je le en magnet ovit z eno tuljavo, pa ne zaznajo samo nihanja strun, temveč tudi električna nihanja, ki jih oddajajo električne naprave v okolici, kar povzroči konstanten šum. Ta problem so rešili tako, da so namesto ene tuljave okoli magneta ovili dve, ki tvorita vsaka svoj inducirani tok, in sta vezani tako, da je fazni premik med signali, ki jih oddajata, takšen, da se šum izniči. Takšni kitarski magneti se v angleščini imenujejo *humbuckers*. Na barvo zvoka pa vpliva tudi pozicija magneta na kitari (ali je bližje vratu kitare, ali bližje mostičku), zato ima večina kitar več magnetov, med katerimi lahko kitarist med igranjem izbira (Woodford, 2022).

Pri merjenju sva uporabila kitaro, ki ima prej opisane *humbucker* magnetne. Vse meritve sva opravila na magnetu, ki je bližje vratu kitare.

#### 2.1.4. Vezje v električni kitari

Na izhodni signal električne kitare vplivata dva osnovna "gumba": *tone control*, ki vpliva na barvo izhodnega signala, in *volume control*, ki vpliva na glasnost oz. jakost izhodnega signala. Spremembo signala z njuno pomočjo dosežemo tako, da obračamo potenciometra, ki sta sestavni del obeh mehanizmov. Potenciometer ima tri priključke. Med prvim in tretjim je vedno enaka upornost, drugi pa deluje kot drsnik, ki spreminja upornost med prvim in drugim ter drugim in tretjim. Če se upornost med prvim in drugim poveča, se med drugim in tretjim zmanjša (Basic electric guitar circuits 2: potentiometers & tone capacitors, 2022).



Slika 1: Shema vezja v električni kitari (Malaker, 2018)

*Volume control* je potenciometer, pri katerem uporabimo vse tri priključke. Inducirana napetost, ki nastane na kitarskih magnetih, je priključena na prvi in tretji priključek, tako da je električni krog sklenjen. Izhod kitare, od koder potem s kablom napetost prenesemo v ojačevalec, da je zvok ojačan, pa je povezan v krog s prvim in drugim priključkom. Tako se vhodna napetost razdeli na dva dela: prvi del gre skozi drugi priključek do izhoda kitare, drugi del pa iz tretjega priključka v zemljo oz. se izniči. Velikost teh delov določa pozicija potenciometra oz. drugega priključka. Ko je drugi priključek čisto pri prvem, je upor od drugega do tretjega priključka tako velik, da gre ves signal proti izhodu. Če pa je drugi priključek pri drugi skrajnosti, gre ves signal skozi tretji priključek v zemljo in je kitara tiha. To prikazuje naslednja enačba, ki opisuje

deljenje napetosti na napetost  $R_1$ , ki je med prvim in drugim priključkom, in  $R_2$ , ki je med drugim in tretjim priključkom<sup>1</sup>:

$$U_i = U_v \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Iz enačbe lahko razberemo, da je izhodna napetost  $U_i = 0$  V, ko je  $R_2 = 0$   $\Omega$ . Ko pa je  $R_1 = 0$   $\Omega$ , je izhodna napetost enaka vhodni (Basic electric guitar circuits 2: potentiometers & tone capacitors, 2022).

Potenciometer *tone controla* je na vezje vezan le z drugim in tretjim priključkom, tako da se upornost poveča z vrtenjem gumba v smeri urinega kazalca. V vezavi s kondenzatorjem tvori t. i. RC filter, ki iz signala izloča višje frekvence. Upornost kondenzatorja je za vse frekvence enaka, vendar se njegova kapacitivna upornost (angleško *impedance*), ki se pri kondenzatorjih pojavi pri izmeničnem toku, spreminja v odvisnosti od frekvence signala in kapacitete kondenzatorja:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Kapacitivna upornost  $X_c$  je obratno sorazmerna s frekvenco izmeničnega toka  $f$  in kapaciteto kondenzatorja  $C$ , kar potrjuje, da je zaporedna vezava upornika in kondenzatorja frekvenčno odvisna. Višja kot je frekvenca, manjša je kapacitivna upornost kondenzatorja in obratno (Basic electric guitar circuits 2: potentiometers & tone capacitors, 2022).

Frekvenco, pri kateri sta ohmska in kapacitivna upornost zaporednega RC kroga enaki, imenujemo mejna frekvenca in jo označimo s  $f_c$ . Izračunamo jo iz pogojev:

$$R = X_c = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

↓

$$\frac{1}{\quad}$$

---

<sup>1</sup>  $U_i$ =izhodna napetost,  $U_v$ =vhodna napetost.

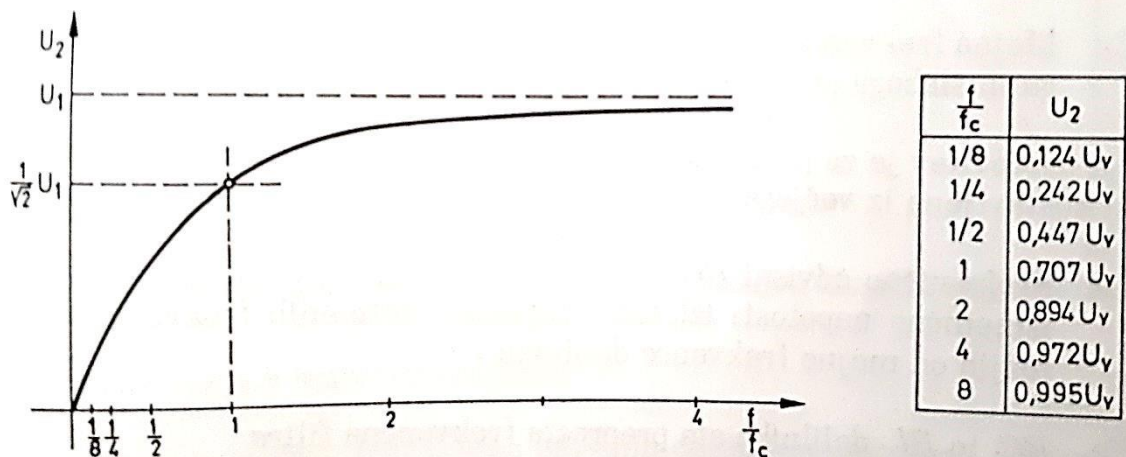
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Izhodna napetost RC filtra je lahko napetost na kondenzatorju ali napetost na uporniku (pri *tone controlu* je izhodna napetost na uporniku). S spreminjanjem frekvence se velikost napetosti na

uporu in kondenzatorju sicer spreminjata, vendar je njuna vsota zmeraj enaka. Spreminjata se tako, da spreminjajoči pravokotni trikotnik, ki ga tvorita z napetostjo izvora  $U_v$  (napetosti na uporniku in kondenzatorju sta kateti, izvorna napetost pa hipotenuza), opisuje polkrog, kar izhaja iz geometrijskega izreka, da so krogu vrisani trikotniki, katerih hipotenuza je enaka premeru, pravokotni trikotniki (Žalar, 2005).

Izhodno napetost  $U_i$  RC filtra lahko računamo na osnovi premege sorazmerja napetosti v krogu in pripadajočih upornosti:

$$U_i = U_v \times \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \right)$$



Slika 2: Frekvenčni potek napetosti na uporniku RC delilnika, pri katerem gre signal najprej skozi kondenzator<sup>2</sup> (Žalar, 2005)

<sup>2</sup> Za RC vezje, pri katerem gre signal prvo skozi upornik, bi dobili obraten potek napetosti na kondenzatorju.

Kot lahko razberemo iz grafa, mejna frekvenca  $f_c$  pomeni »mejo«, ki ločuje frekvenčno področje slabega in frekvenčno območje dobrega prenosa vhodne napetosti  $U_v$  na izhod (Žalar, 2005).

RC delilniki napetosti tako omogočajo, da iz sestavljene izmenične napetosti izločimo napetosti neželenih frekvenc (višjih od mejne frekvence delilnika, če je izhodna napetost na uporniku, in

---

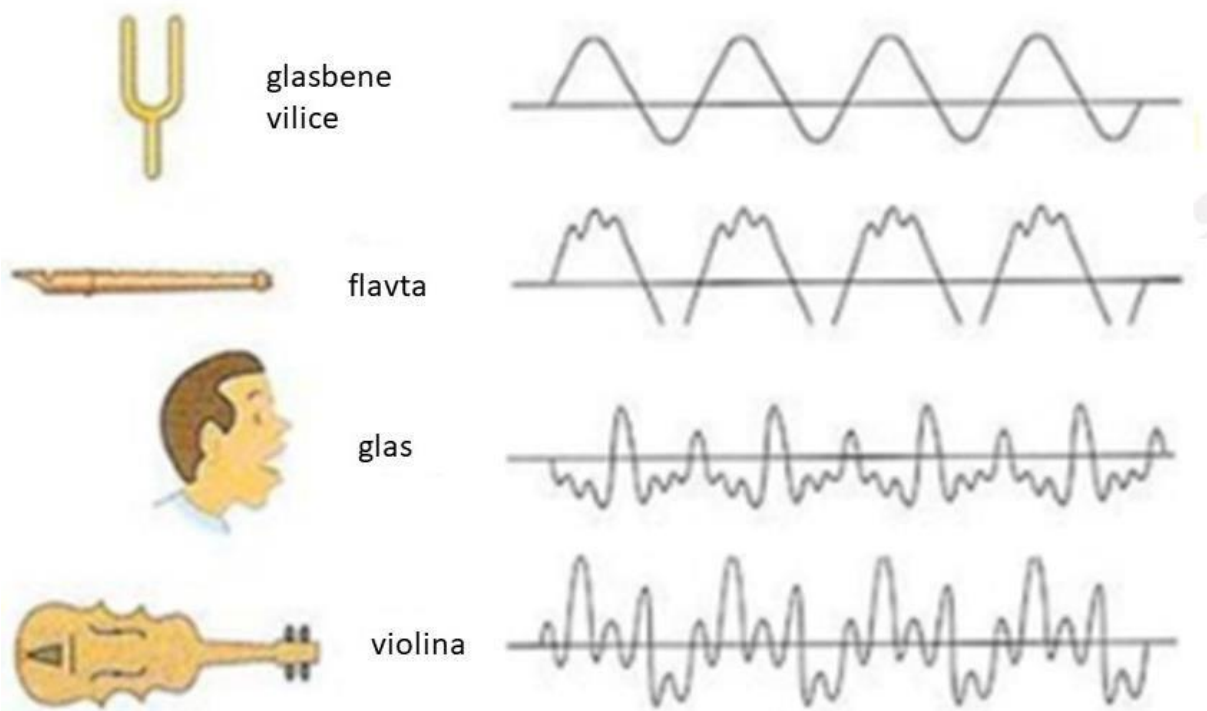
nižje od mejne frekvence delilnika, če je izhodna napetost na kondenzatorju)<sup>3</sup> (Žalar, 2005). To je tudi funkcija *tone control*, ki iz signala električne kitare izloči več ali manj višjih harmonikov in tako spremeni barvo zvoka (Basic electric guitar circuits 2: potentiometers & tone capacitors, 2022).

## 2.2. Zvok in barva zvoka

Zvok je sinusno longitudinalno valovanje. Namesto v obliki hribov in dolin se premika v obliki zgoščin in razredčin. V primeru kitare nastane zvok v tanki plasti zvoka ob struni. Valovanje se širi v vseh smereh od vira. Pri longitudinalnem valovanju je zelo pomembna sprememba zračnega tlaka v mediju, v katerem se nahaja valovanje. Zvočni tlak je višji na območju zgoščine, manjši pa na območju razredčine. Sorazmerno z zvočnim tlakom se spreminja tudi gostota snovi. Spremembe zvočnega tlaka in gostote snovi je večja v snoveh z večjo osnovno gostoto in pri valovanju z višjimi frekvencami. Zvočni tlak v večini primerov ni tolikšen, da bi povzročil opazne mehanske spremembe. Najvišji zvočni tlak, ki ga lahko zazna človeško uho je  $20 \text{ N/m}^2$ , kar pri površini bobniča  $0,50 \text{ cm}^2$  pomeni najvišjo silo  $1,0 \text{ mN}$  (Kladnik & Kodba, 2020).

---

<sup>3</sup> Izraz *izhodna napetost* bova v tej raziskovalni nalogi uporabljala za napetost, ki je med izhodom električne kitare in komponente RC filtra, skozi katero gre signal najprej skozi (pri sliki 2 je to kondenzator, pri vezju električne kitare je to upornik oz. potenciometer).



Slika 3: Valovanje z isto osnovno frekvenco različnih virov zvoka (Rajgelj, 2022)

Posamezni toni vzbujajo v ušesu neprijeten občutek, zato je z glasbenega vidika ugodnejši zvok, pri katerem so ob osnovni frekvenci zvoka prisotne še druge frekvence, ki so celoštevilski večkratniki osnovne – višji harmoniki. Kljub temu da ima več tonov skupno osnovno frekvenco, jih lahko ločimo, saj imajo različne višje harmonike. Vsak ton je seštevek vseh frekvenc, razlika med njimi pa je majhna in ljudje jih ne slišimo posamično, ampak kot barvo tona. Človeško uho lahko loči že majhne spremembe v barvi zvoka. Barvo tona je nemogoče objektivno opisati, zvok je glede na barvo lahko čist, topel, oster, širok, temen, svetel, težek, lahek... Kljub temu pa je med barvami in zvokom nekaj povezav: obe veličini predstavljata valovanje, v primeru barv je to elektromagnetno valovanje, v primeru zvoka pa longitudinalno. V vidnem spektru lahko vidim sedem barv, zvok pa ima 7 osnovnih tonov. (Barva tona, 2022)

### 2.3. Raziskovalno vprašanje

Ali je mogoče z analizo višjih harmonikov in lastne frekvence signala električne kitare preveriti lastnosti RC filtra in če da, kakšna je frekvenčna odvisnost in vpliv spreminjanja upora na mejno frekvenco  $f_c$ ?

## 2.4. Cilji raziskovalne naloge

Cilj raziskovalne naloge je preveriti prej omenjene lastnosti RC filtra z analizo višjih harmonikov in lastne frekvence signala električne kitare. Raziskovala sva, kako se spreminja razmerje med amplitudo višjih harmonikov in amplitudo lastne frekvence, ko spreminjava nastavitve *tone controla*, in kako se razlikuje pri meritvah signala z magneta in signala z vezja. Na podlagi teh rezultatov sva preverjala lastnosti RC filtra.

## 2.5. Raziskovalne metode

### 2.5.1. Seznam uporabljene opreme

Pri delu raziskovalne naloge sva uporabila:

- kable s priključki in krokodilčki,
- merilec upornosti (multimeter) Extech instruments,
- vmesnik Labquest mini - Vernier,
- električno kitaro Epiphone Les Paul Special II,
- računalnik s programsko opremo Windows in programom Logger Pro 3.16.2
- trzalico in
- kapodaster<sup>4</sup>.

### 2.5.2. Način pridobivanja rezultatov

Opravljala sva štiri različne meritve, ki se delijo na dva različna načina merjenja glede na vir signala: merjenje signala na izhodu kitara in merjenje signala na magnetu. Izmerila sva tudi upornost potenciometra *tone controla* med drugim in tretjim priključkom pri vseh njegovih nastavitvah (kot so razdeljene na gumbu na kitari). Meritve sva opravila z multimetrom, nato sva iz podatkov naredila graf, da sva si jih lažje predstavljala.

Vse meritve sva opravila s programom Logger Pro 3.16.2, ki nama je skupaj z vmesnikom

---

<sup>4</sup> Pripomoček, ki ga namestimo na vrat in s tem skrajšamo dolžine vseh strun ter tako transponiramo akorde in tone, ki jih igramo na odprtih strunah.

Labquest mini - Vernier omogočal merjenje 100.000 meritev na sekundo, kar nama je omogočalo veliko natančnost pri merjenju različnih frekvenc in njihovih amplitud. Program nama je omogočal tudi izdelavo FFT grafov, ki so nama te podatke prikazali.

---

Frekvenco sva spreminjala s premikanjem kapodastra po vratu kitare, nato sva zaigrala struno s trzalico in tako ustvarila tako električni kot tudi akustični signal.

Signal sva iz magneta pridobila tako, da sva krokodilčke priključila na žici, ki povezujejo magnet in vezje. S teh krokodilčkov sva signal speljala preko prej omenjenega vmesnika do programa, kjer sva ga obdelala.

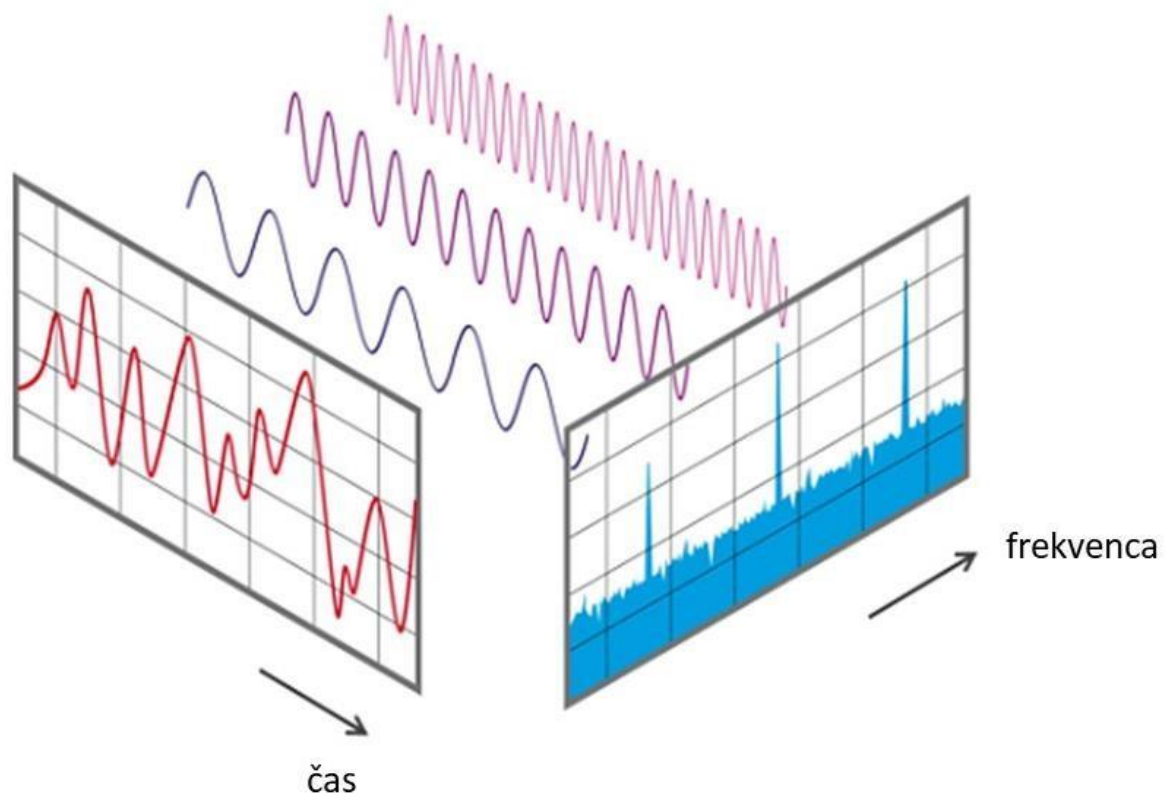
Za merjenje električnega signala, ki je šel skozi vezje električne kitare, sva priključila kitarski kabel v kitaro na eni strani, na drugi strani pa sva nanj pritrčila krokodilčke in signal po prej omenjenem postopku obdelala. Na kitari sva potenciometer *tone controla* nastavila na njegovo največjo nastavitev, ki je na gumbu na kitari označena z 10 in pri tej oznaki napravila črtico, s pomočjo katere sva lahko natančneje nastavljal potenciometer (vsako številko, ki je označena na gumbu sva postavila na črtico).

Za opravljanje analize sva izbrala frekvenco 440 Hz, torej ton A, ker s svojima prvima višjima harmonikoma predstavlja velik obseg frekvenc od relativno nizkih (440 Hz) do višjih (1320 Hz) in ker je ton A eden od osnovnih tonov.

### 2.5.3. FFT – Hitra Fourierjeva transformacija

Hitra Fourierjeva transformacija je pomembna merilna metoda v znanosti o meritvah zvoka in akustike. FFT lahko pretvori signal v posamezne spektralne komponente in nam tako predstavi posamezne frekvenčne informacije o signalu. Hitra Fourierjeva transformacija je optimiziran algoritem za izvajanje diskretne Fourierjeve transformacije (DTF). Z njo lahko signal v določenem obdobju razdelimo na njegove frekvenčne komponente, to so posamezna sinusna nihanja, ki nihajo z različnimi frekvencami in amplitudami. (Fast Fourier Transformation FFT - Basics, 2022)





Slika 4: Prikaz delovanja FFT za nihanje sestavljeno iz treh različnih sinusnih nihanj. (Fast Fourier Transformation FFT - Basics, 2022)

Vse meritve opravljene med raziskovalno nalogo sva obdelala s pomočjo FFT s programom Logger Pro 3.16.2. Na takšen način sva lahko ugotavljala, iz katerih frekvenc je sestavljen signal in kakšne amplitude imajo te frekvence.. Za naju so bili pomembni le višji harmoniki in njihove amplitude (relativno na amplitudo osnovne frekvence), ki sva jih pridobila iz FFT grafa na programu Logger Pro<sup>5</sup>. Podane so bile na ordinatni osi s skalo, ki ni imela realnega geometrijskega pomena, zato sva razbrala vrednosti vseh frekvenc ter odnos med višjimi harmoniki in lastno frekvenco zapisala v odstotkih. Te podatke sva nato uporabila za analizo rezultatov in risanje grafov.

## 2.6. Predvideni rezultati

Pred začetkom eksperimentiranja sva na podlagi teoretičnega ozadja razmislila, kakšni bi lahko bili rezultati. Pri drugem višjem harmoniku, ki niha s frekvenco 1320 Hz bo amplituda izhodne

<sup>5</sup> Višji harmoniki so večkratniki osnovne frekvence.

---

napetosti  $U_i$ , manjša, kot bo pri prvem višjem harmoniku, ki niha s frekvenco 880 Hz, saj se, kot je pojasnjeno v poglavju 3.1.4., izhodna napetost manjša, če se frekvenca večja.

Pri merjenju upornosti potenciometra v RC filtru na različnih nastavitvah bo največja upornost pri nastavitvi 0, srednje velika upornost pri nastavitvi 5 in največja upornost pri nastavitvi 10, saj se mejna frekvenca in izhodna napetost manjšata, ko upornost narašča (pojasnjeno v poglavju 3.1.4.), kar pa je možno slišati tudi v praksi, saj je pri nastavitvi *tone control* 0 zvok električne kitare najbolj spremenjen, pri nastavitvi 5 srednje spremenjen, pri nastavitvi 10 pa praktično nespremenjen. Zaradi tega sklepava, da bo tudi mejna frekvenca  $f_c$  bo najnižja takrat, ko bo *tone control* nastavljen na 0, srednje visoka, ko bo *tone control* nastavljen na 5 in najvišja, ko bo *tone control* nastavljen na 10.

### 3. REZULTATI IN IZRAČUNI

---

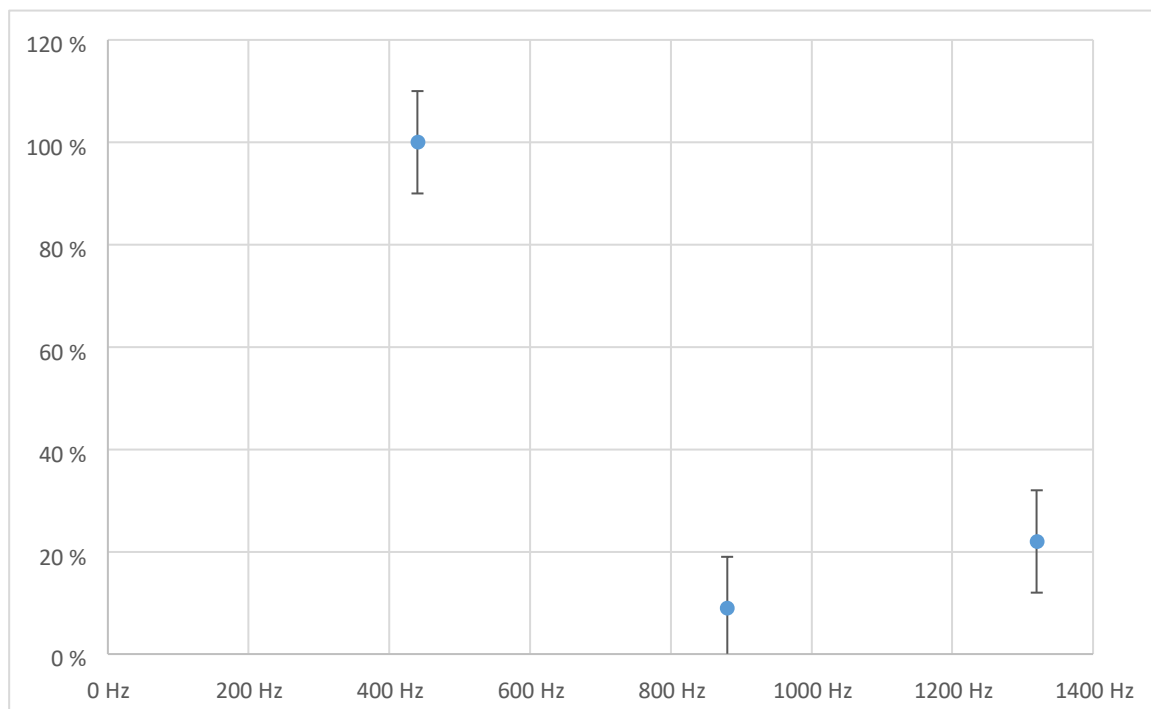
#### 3.1. Predstavitev rezultatov

Rezultate meritev sva prikazala s sledečimi grafi. Na abscisni osi grafov so vrednosti lastne frekvence in prvih dveh višjih harmonikov, na ordinatni osi pa njihova relativna amplituda, podana v odstotkih.

Kapaciteta kondenzatorja je  $C = 22 \text{ nF}$ , saj je v kitari filmski kondenzator 2A223J.

(POLYESTER FILM CAPACITOR 2A223J 100VDC 22NF 0.022U, 2022)

#### 3.2. Meritev opravljena na magnetu



*Slika 5: lastna frekvenca 440 Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena na magnetu*

Graf 1 prikazuje višje harmonike in lastno frekvenco, kot so bili izmerjeni na magnetu, ne da bi signal tekel skozi vezje. Prva pika na grafu prikazuje osnovno lastno frekvenco, ki znaša 100 %, druga znaša 9 %, tretja pa 22 %. Vidimo, da je osnovna frekvenca mnogo višje od obeh višjih harmonikov.

Vhodno napetost oz. napetost, ki jo inducira nihanje strune v tuljavi, sva razbrala iz te meritve. Zaradi lastnosti FFT grafa, ki ga izriše program Logger Pro, da so na njem podane amplitude napetosti frekvenc oz. višjih harmonikov, ki so prisotni v signalu, sva lahko namesto napetosti  $U_v$ , podane z volti, za računanje izhodne napetosti uporabila amplitude višjih harmonikov in lastne frekvence relativno na amplitudo lastne frekvence. Tako sva dobila vhodno amplitudo  $A_v$  za vsako merjeno frekvenco (440 Hz, 880 Hz in 1320 Hz) podano z %, s katero sva izračunala izhodne amplitude  $A_i$  po tem, ko je na signal vplival RC filter pri različnih nastavitvah. Izračunane rezultate bova uporabila za primerjavo z rezultati, ki sva jih izmerila na izhodu električne kitare.

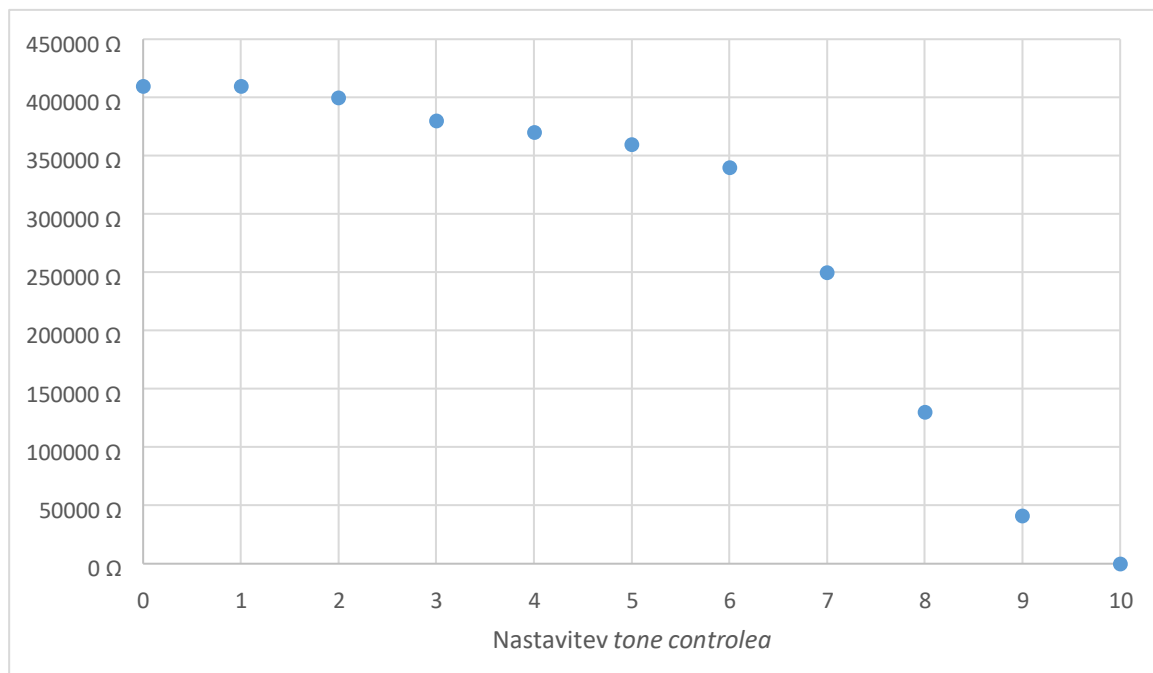
Vhodne amplitude za merjene frekvenco so:

$$A_{v440} = 100 \times (1 \pm 10\%) \%$$

$$A_{v880} = 9 \times (1 \pm 10\%) \%$$

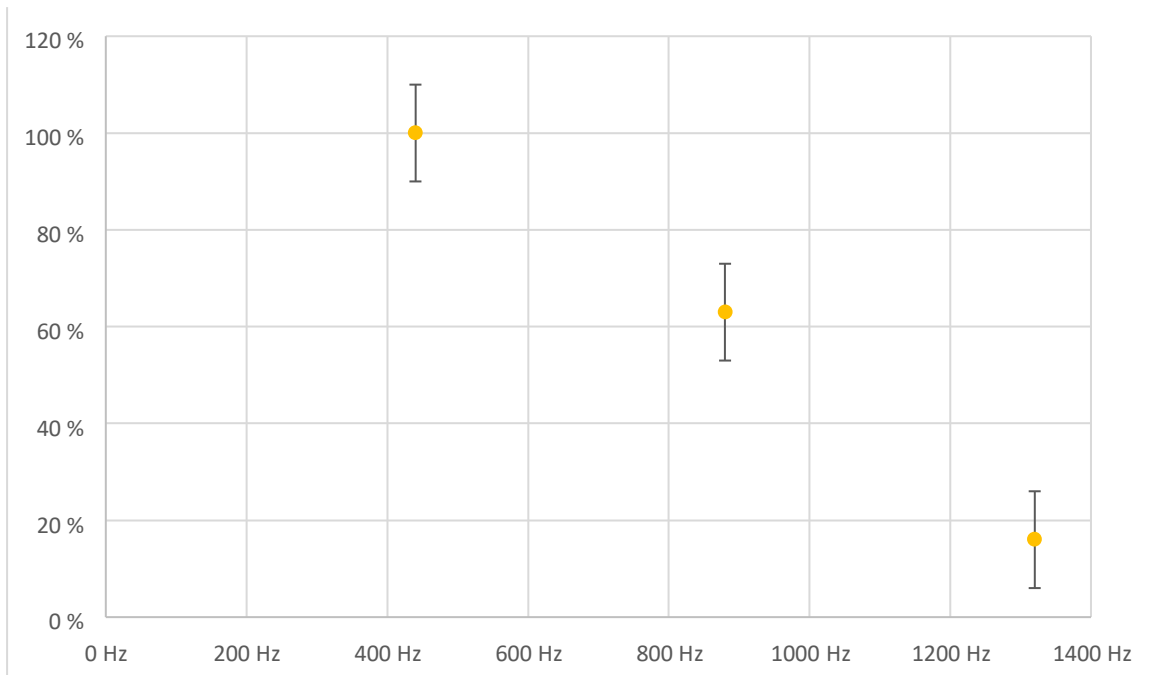
$$A_{v1320} = 22 \times (1 \pm 10\%) \%$$

Sodeč po več meritvah, ki sva jih opravila na isti frekvenci in nastavitvi, predpostavljava, da je pri merjenju nastala absolutna napaka 10 %.



Slika 6: upornost potenciometra v RC filtru pri različnih nastavitvah, kot so označene na kitari

### 3.3. Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 10



*Slika 7: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 10*

Graf 5 prikazuje višje harmonike in lastno frekvenco, ki sva jih izmerila na izhodu kitare – to predstavlja celoten signal električne kitare. RC filter kitare je nastavljen na 10 (16  $\Omega$ , razvidno iz grafa 2), kar pomeni da je upor v primerjavi z drugimi vrednostmi najmanjši. Pri tej nastavitvi je signal kitare najmanj spremenjen. Prva pika na grafu prikazuje osnovno lastno frekvenco, ki znaša 100 %, druga znaša 63 %, tretja pa 16 %.

Mejno frekvenco RC filtra pri tej nastavitvi izračunamo tako:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 16 \Omega \times 22 \text{ nF}} = 0.45 \text{ MHz}$$

Izhodno amplitudo  $A_i$  pri frekvencah 440 Hz, 880 Hz in 1320 Hz, lahko iz podatkov, pridobljenih v poglavju 4.2., izračunamo s pomočjo naslednje enačbe:

$R$

$$A_i = A_v \times \left( \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}} \right)$$

$f$ [Hz]	$A_i$ [%]
440	$100 \pm 10$
880	$9 \pm 10$
1320	$22 \pm 10$

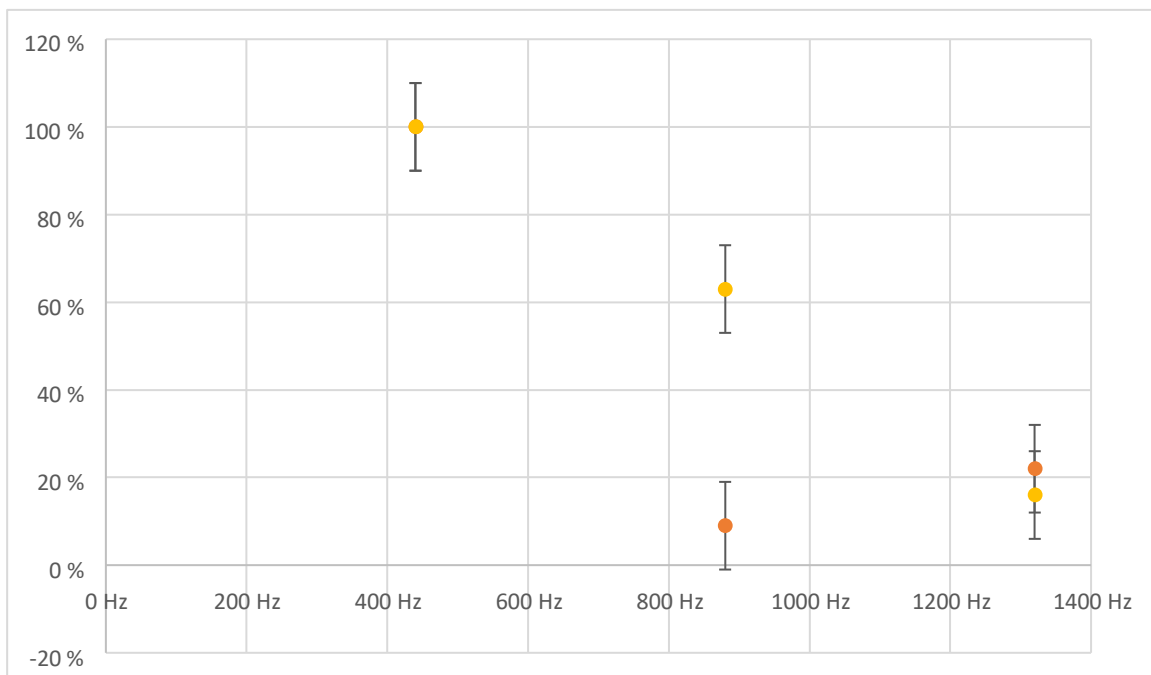
Slika 8: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 10 ( $R=16 \Omega$ )

Da sva lahko izračunane podatke primerjala s tistimi, ki sva jih na izhodu kitare izmerila, sva jih morala predstaviti relativno na  $A_{i440}$ :

$$\frac{A_{i440}}{A_{i440}} = \frac{A_{i440}}{A_{i440}} = 100 \% \pm 10 \% = 100 \times (1 \pm 10\%) \%$$

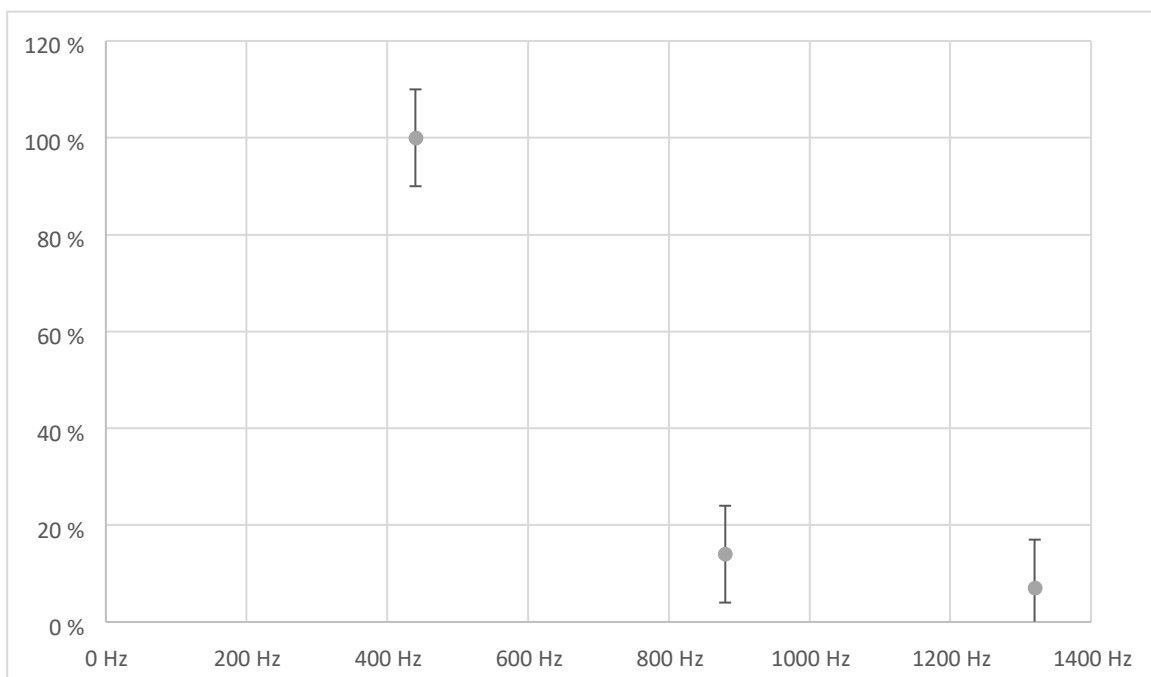
$$\frac{A_{i880}}{A_{i440}} = \frac{A_{i880}}{A_{i440}} = 9 \% \pm 10 \% = 9 \times (1 \pm 111\%) \%$$

$$\frac{A_{i1320}}{A_{i440}} = \frac{A_{i1320}}{A_{i440}} = 22 \% \pm 10 \% = 22 \times (1 \pm 45\%) \%$$



Slika 9: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 10 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 10

### 3.4. Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 5



Slika 10: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 5

Graf 4 prikazuje višje harmonike in lastno frekvenco, ki sva jih izmerila na izhodu kitare – to predstavlja celoten signal električne kitare. RC filter kitare je nastavljen na 5 (360 kΩ, razvidno iz grafa 2). Prva pika na grafu prikazuje osnovno lastno frekvenco, ki znaša 100 %, druga znaša 14 %, tretja pa 7 %.

Mejno frekvenco RC filtra pri tej nastavitvi izračunamo tako:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 360 \text{ k}\Omega \times 22 \text{ nF}} = 20 \text{ Hz}$$

Izhodno amplitudo  $A_i$  pri frekvencah 440 Hz, 880 Hz in 1320 Hz, lahko iz podatkov, pridobljenih v poglavju 4.2., izračunamo s pomočjo naslednje enačbe:

$$A_i = A_v \times \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}} \right)$$

$f$ [Hz]	$A_i$ [%]
440	0,10 ± 0,01
880	0,002 ± 0,003
1320	0,003 ± 0,001

Slika 11: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 5 ( $R=360000 \Omega$ )

Da sva lahko izračunane podatke primerjala s tistimi, ki sva jih na izhodu kitare izmerila, sva jih morala predstaviti relativno na  $A_{i440}$ :

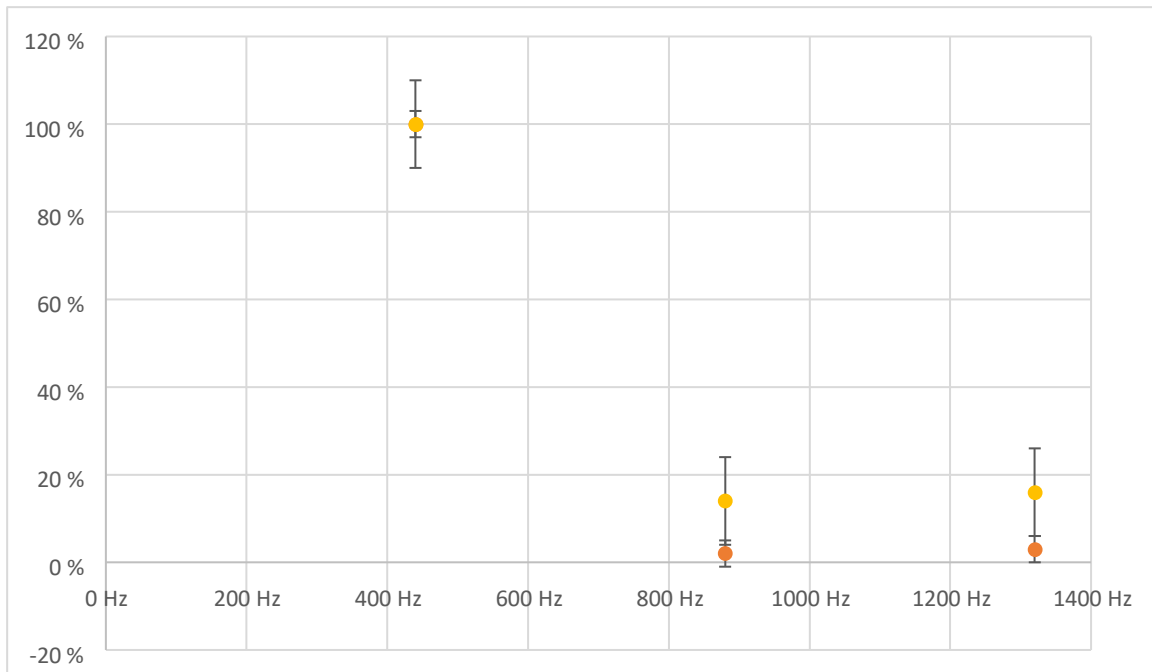
$$= A_{i440} = 100 \% \pm 20 \% = 100 \times (1 \pm 20 \%) \%$$



$$A_{i440} \quad A_{i440}$$

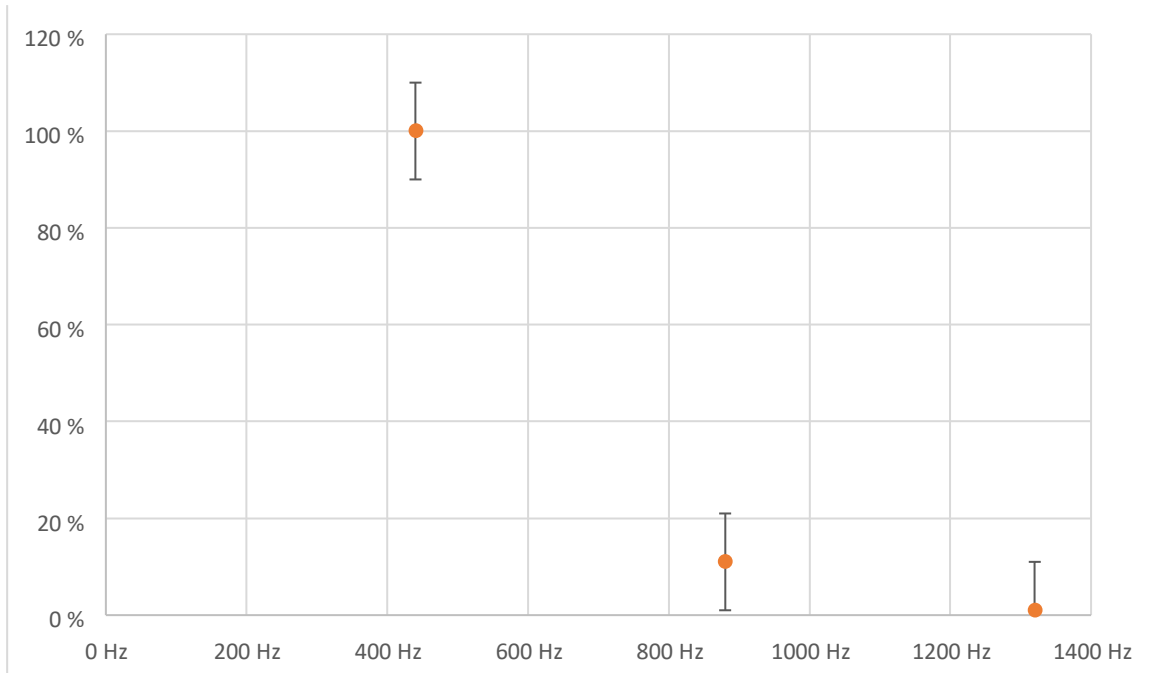
$$' = A \frac{i^{880}}{A_{i440}} = 2 \% \pm 3 \% = 2 \times (1 \pm 160 \%) \%$$

$$' = A \frac{i^{1320}}{A_{i440}} = 3 \% \pm 1 \% = 3 \times (1 \pm 43 \%) \%$$



*Slika 12: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 5 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 5*

### 3.5. Meritev opravljena na tone controlu pri nastavitvi 0



Slika 13: lastna frekvenca 440 Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 0

Graf 3 prikazuje višje harmonike in lastno frekvenco, ki sva jih izmerila na izhodu kitare – to predstavlja celoten signal električne kitare. RC filter kitare je nastavljen na 0 (410 kΩ, razvidno iz grafa 2). Pri tej nastavitvi gre skoraj ves signal skozi RC filter, kar pomeni, da je signal najbolj spremenjen. Prva pika na grafu prikazuje osnovno lastno frekvenco, ki znaša 100 %, druga znaša 11 %, tretja pa 1 %.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 410 \text{ k}\Omega \times 22 \text{ nF}} = 18 \text{ Hz}$$

Izhodno amplitudo  $A_i$  pri frekvencah 440 Hz, 880 Hz in 1320 Hz, lahko iz podatkov, pridobljenih v poglavju 4.2., izračunamo s pomočjo naslednje enačbe:

$R$

$$A_i = A_v \times \left( \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}} \right)$$

$f$ [Hz]	$A_i$ [%]
440	$0,080 \pm 0,008$
880	$0,002 \pm 0,002$
1320	$0,002 \pm 0,0009$

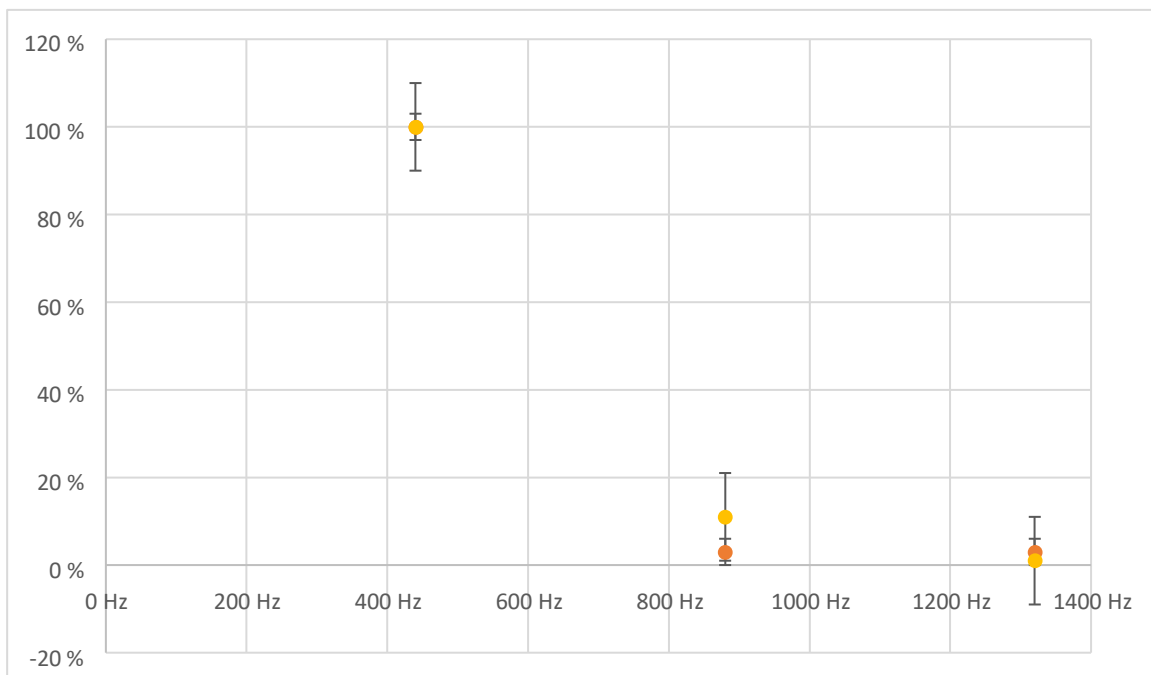
Slika 14: Izhodna amplitude različnih frekvencah, ko je tone control nastavljen na 0 ( $R=410000 \Omega$ )

Da sva lahko izračunane podatke primerjala s tistimi, ki sva jih na izhodu kitare izmerila, sva jih morala predstaviti relativno na  $A_{i440}$ :

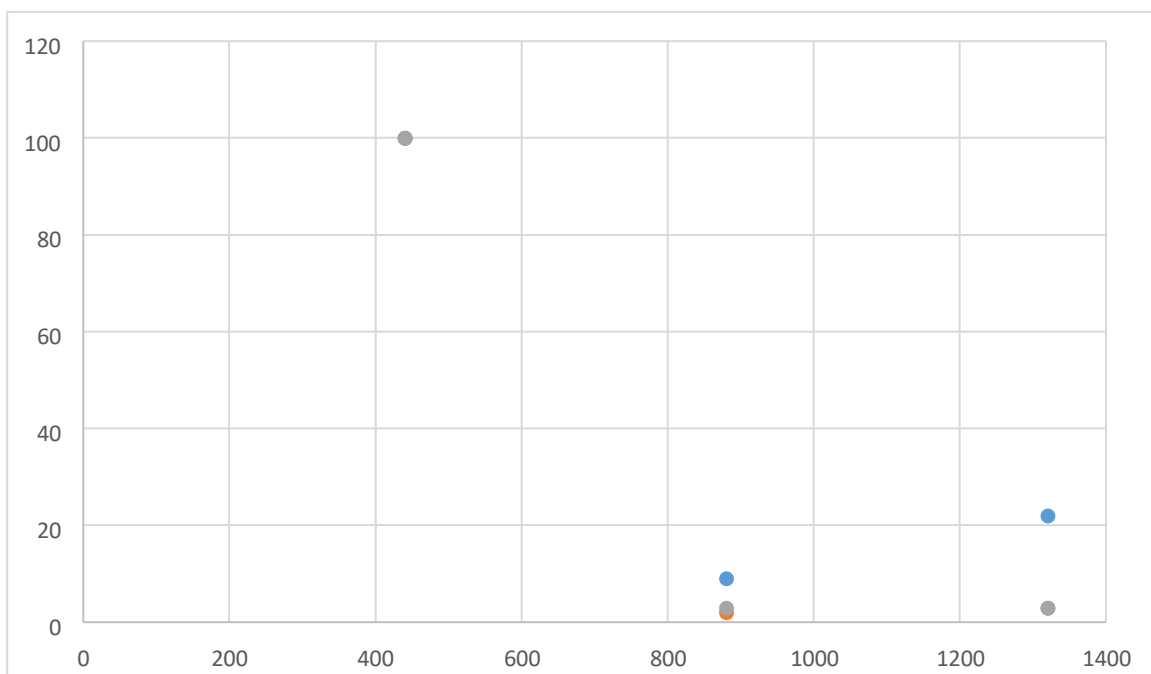
$$\frac{A_{i440}}{A_{i440}} = A_{i440} = 100 \% \pm 20 \% = 100 \times (1 \pm 20 \%) \%$$

$$\frac{A_{i880}}{A_{i440}} = A_{i880} = 3 \% \pm 3 \% = 2,25 \times (1 \pm 110 \%) \%$$

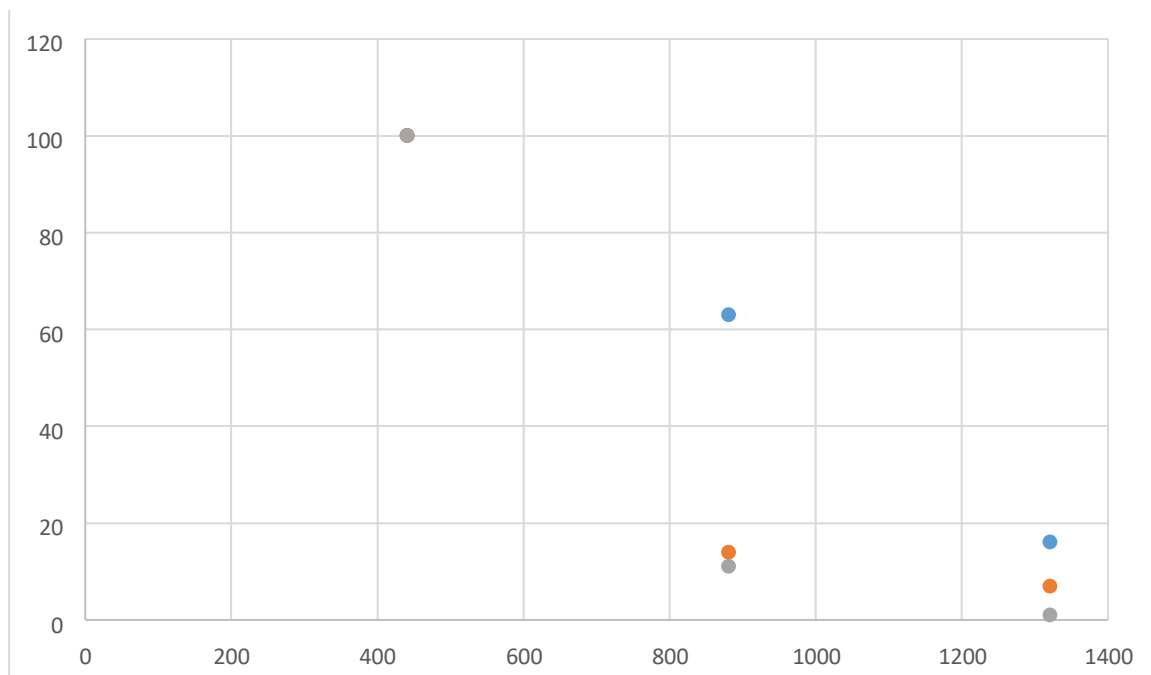
$$\frac{A_{i1320}}{A_{i440}} = A_{i1320} = 3 \% \pm 1 \% = 3 \times (1 \pm 45 \%) \%$$



Slika 15: lastna frekvenca 440Hz in njena prva dva višja harmonika, izmerjena preko RC filtra, pri nastavitvi 0 in izračunana iz podatkov pridobljenih iz merjenja na magnetu in merjenja upornosti potenciometra na nastavitvi 0



Slika 16: Preimerjava izračunanih srednjih vrednosti izhodne amplitude lastne frekvence in prvih dveh višjih harmonikov pri treh merjenih nastavitvah tone controlea



Slika 17: Preimerjava izmerjenih srednjih vrednosti izhodne amplitude lastne frekvence in prvih dveh višjih harmonikov pri treh merjenih nastavitvah tone controlee

#### 4. Razprava in interpretacija rezultatov

Podatki, ki sva jih izmerila in izračunala, nama ponujajo vpogled v delovanje RC filtra in odgovore na raziskovalno vprašanje. Z raziskovanjem vpliva *tone controlea* na amplitudo višjih harmonikov v primerjavi z amplitudo lastne frekvence pri različnih nastavitvah potenciometra in amplitudo istih frekvenc pri merjenju signala, ki je induciran na magnetu, je mogoče analizirati lastnosti RC filtra, ki so podane v teoriji.

Frekvenčno odvisnost RC delilnika napetosti, torej da je kapacitivna upornost kondenzatorja manjša, če je frekvenca večja, je razvidna na sliki 16, saj se relativna amplituda prvega, ki niha s frekvenco 880 Hz, pri menjavi nastavitve *tone controlea* iz 10 na 5 spremeni za 7 %, pri drugem višjem harmoniku, ki niha s frekvenco 1320 Hz, pa za 19 %, kar je več kot je predvidena napaka merjenja. Razlika pri relativnih amplitudah teh frekvenc, ko se spremeni nastavitev *tone controlea* s 5 na 0 je manjša, saj je tudi razlika v spremembi upora med nastavitvijo 5 in 0 manjša, kot je med nastavitvijo 10 in 5, kar je razvidno tudi na sliki 6. Podobne ugotovitve lahko razberemo tudi iz slike 17, vendar so tam razlike manjše.

Odvisnost mejne frekvence RC filtra  $f_c$  in izhodne amplitude napetosti  $A_i$  od upornosti potenciometra v dotičnem vezju (večja kot je napetost, manjša sta  $f_c$  in  $A_i$ ) je mogoče razbrati na slikah 16 in 17, saj so izhodne amplitude pri meritvah in izračunih pri nastavitvi *tone control* 10 višje, kot pri nastavitvi 5, najmanjše pa so pri nastavitvi 0. Na sliki 6 je razvidno, da je pri nastavitvi 0 upornost potenciometra največja, pri nastavitvi 5 srednje velika in pri nastavitvi 10 najmanjša, kar, v kombinaciji s prej omenjenimi podatki o izhodni amplitudah, dokazuje odvisnost izhodnih amplitud od upornosti potenciometra. Podobno je razvidno iz izračunov mejnih frekvenc (pri nastavitvi 10 je mejna frekvenca 450000 Hz, pri nastavitvi 5 je mejna frekvenca 20 Hz in pri nastavitvi 0 je mejna frekvenca RC filtra 18 Hz), ki se manjšajo sorazmerno z večanjem upornosti. Tudi krivulja padanja mejnih frekvenc in izhodne amplitude je enaka krivulji višanja upornosti, kar sva pojasnila tudi v prejšnjem odstavku.

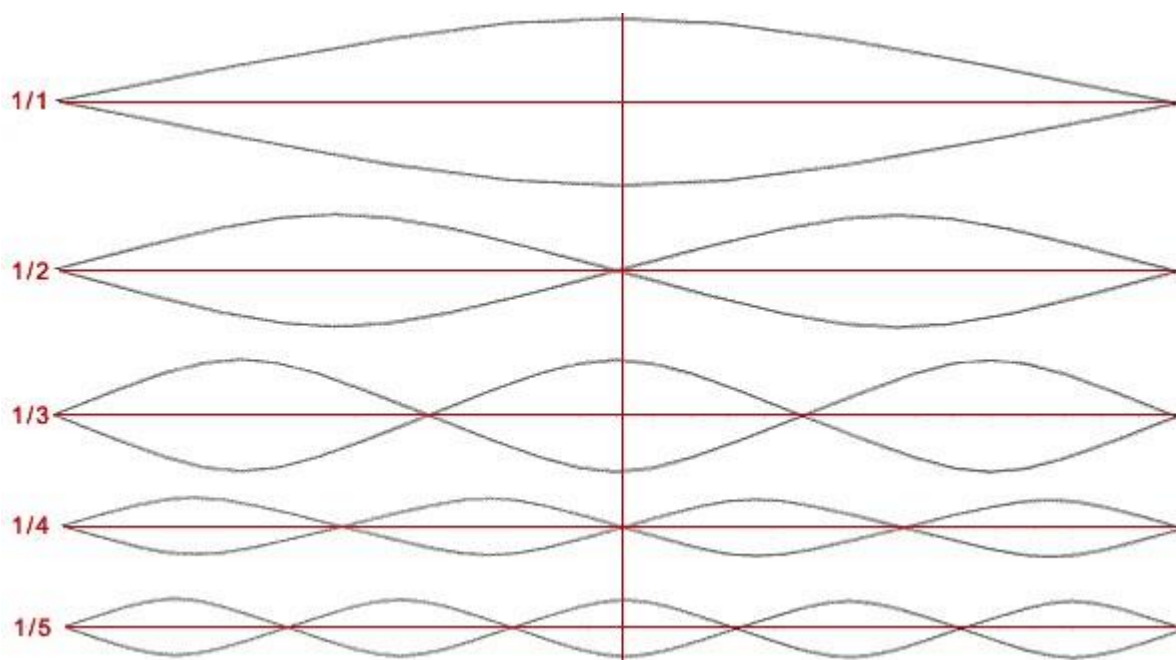
Najine ugotovitve se ujemajo s pričakovanimi rezultati, ki sva jih postavila na podlagi teorije, kar pomeni, da so najine ugotovitve skladne tudi s teorijo in sva tako uspešno preverila lastnosti RC filtra. Ugotovitve so skladne tudi s praktično uporabo *tone control*, saj barva zvoka postaja vedno temnejša (signal ima vedno manjšo amplitudo višjih harmonikov) sorazmerno z vrtenjem potenciometra od nastavitve 10 do nastavitve 0, kar povzroči, da upornost potenciometra raste, mejna frekvenca vezja in izhodna amplituda višjih harmonikov pa padata.

Rezultati, ki sva jih dobila ob merjenju, so, če upoštevava merske napake, skladni z rezultati, ki sva jih izračunala s pomočjo meritev na magnetu (razvidno iz slik 15, 12 in 9), kar pomeni, da so bile najine metode merjenja uspešne. Rezultat, ki sva ga dobila pri merjenju signala iz vezja na nastavitvi *tone control* 10, bi razglasila za nenatančen in neveljaven, saj pride pri prvem višjem harmoniku do velikega odstopanja v primerjavi z meritvami pri ostalih nastavitvah in pri meritvah na magnetu, saj dosega kar 63 %, kar je večje od predvidene napake merjenja, zato iz tega rezultata ni mogoče sklepati ugotovitev.

Kljub potrditvi teorije, pa so najine ugotovitve omejene, saj sva pri poskusih uporabila zgolj eno kitaro in en magnet. V kitarski industriji je v uporabi mnogo različnih magnetov, potenciometrov in ostalih komponent, ki vplivajo na barvo zvoka, zato bi bilo bolj znanstveno, da bi meritve izvedla na različnih kitarah, kar pa zahteva preveč časa in denarja, da bi bilo izvedljivo v enem šolskem letu. Veliko časa sva porabila že s tem, da sva izmerila signal na magnetu in vseh nastavitvah *tone control* pri desetih frekvencah, saj sva želela imeti vpogled v višje harmonike pri ostalih frekvencah, preden sva se odločila za 440 Hz.

#### 4.1. Možne napake pri merjenju

Do nenatančnosti pri merjenju vseh frekvenc zvoka je lahko prišlo zaradi lastnosti valovanja same strune in pozicije magnetov, ki merijo valovanje.



Slika 18: ločen prikaz sestavnih delov sinusnega valovanja. (Nihanje strune, 2004)

Zvok je sestavljen iz več valovanj, če se magnet nahaja na mestu, kjer nek višji harmonik ne valuje (na primer na petini, šestini, sedmini ... strune), potem te frekvence valovanje magneti ne zaznajo. Ker se zaradi igranja različnih tonov »spreminja dolžina strune« tega pojava ne moremo izločiti iz meritev z odstranitvijo enega višjega harmonika, ampak je lahko pri različnih meritvah, in tonih slabše zaznana različna višja harmonika. Pri nekaterih meritvah je bila amplituda višjega harmonika višja kot amplituda osnovne frekvence, do tega je prišlo zaradi postavitve magneta na kitari in karakteristike nihanja višjih harmonik strune. (21 Valovanje, 2022)

Do naključnih napak bi lahko prišlo tudi zaradi človeške napake, tako pri odčitavanju podatkov iz grafov, kot pri igranju strune s trzalico. Pri igranju strune s trzalico je nemogoče vsakič enako močno zaigrati struno.

#### 4.2. Družbena odgovornost

Pri sami izvedbi raziskovalne naloge ni bilo nobenih varnostnih pomislekov, vse napetosti, ki sva jih merila so bile posledica indukcije, torej so bile zelo nizke. Med izvajanjem meritev kitare in drugih pripomočkov nisva uničila, po raziskovanju sva kitaro uspela vrniti v prvotno stanje. Z razumevanjem teorije, ki sva jo v raziskovalni nalogi raziskovala je lažje izbrati komponente,

ki nama zvokovno ustrezajo (različne magnetne in potenciometre), saj točno veva kaj vpliva na barvo zvoka in kako. Če te teorije ne bi znala, bi komponente izbirala naključno, kar bi povečalo možnost, da nama izbrana komponenta ne bi ustrezala in bi s tem povzročila več nepotrebnih odpadkov.

Znanje o tem kar vpliva na barvo zvoka je lahko uporabno tudi pri ustvarjanju glasbe, saj nas različni zvoki navdihnejo na različne načine. To, da razumeva, kako različne zvoke narediti, lahko razširi spekter glasbe in umetnosti, ki jo lahko ustvariva in tako doprineseva k družbi.

## 5. Zaključek

---

Med raziskovanjem sva se naučila veliko novih raziskovalnih postopkov. Naučila sva se uporabljati nov program Logger Pro in delati v skupini. Raziskovalno znanje, ki sva ga dobila nama bo koristilo pri profesionalni poti in študiju. Najini rezultati bi bili bolj zanesljivi tudi, če bi ugotovila, kako bi lahko struno vsakič zanihala enako močno. Meniva, da bi bilo najino raziskovalno nalogo v prihodnjih letih vredno nadaljevati in nadgraditi. Cilj tega bi bilo opravljanje meritev na več kitarah in frekvencah. V nadaljevanju bi lahko iz pridobljenih rezultatov ustvarila tudi svoj *tone control*, ki bi ga po izbiri prilagodila, s tem, da bi npr. spreminjanje upornosti potenciometra naredila linearnejše, ali pa bi ustvarila večji razpon upornosti, ki bi RC filtru omogočal bolj postopno spreminjanje zvoka.



## 6. BIBLIOGRAFIJA

---

- 21 *Valovanje.* (5. marec 2022). Pridobljeno iz Valovanje:  
<http://www.diameter.si/sciquest/ch21.pdf>
- Barva tona.* (5. marec 2022). Pridobljeno iz eucbeniki:  
<https://eucbeniki.sio.si/gls/3247/index2.html>
- Basic electric guitar circuits 2: potentiometers & tone capacitors.* (5. marec 2022). Pridobljeno iz Amplified parts: <https://www.amplifiedparts.com/tech-articles/basic-electric-guitarcircuits-2-pots-tone-capacitors>
- Fast Fourier Transformation FFT - Basics.* (5. marec 2022). Pridobljeno iz NTi Audio:  
<https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>
- Harvey, D. (5. marec 2022). *Electric guitar.* Maribor, Maribor, Slovenija.
- Kladnik, R., & Kodba, S. (2019). *Elektrika, magnetizem in atomi: učbenik za fiziko za gimnazije in srednje šole 3.* Ljubljana: DZS.
- Kladnik, R., & Kodba, S. (2020). *Energija, toplota, nihanje in valovanje: učbenik za fiziko za gimnazije in srednje šole 2.* Ljubljana: DZS.
- Makalin, C. (29. december 2019). *Fast Fourier Transform.* Pridobljeno iz towards science:  
<https://towardsdatascience.com/fast-fourier-transform-937926e591cb>
- Malaker, E. (11. maj 2018). *Tone Control Wiring for Your Guitar – Do it Yourself!* Pridobljeno iz Humbucker soup: <https://humbuckersoup.com/tone-control-wiring/>
- Nihanje strune.* (15. november 2004). Pridobljeno iz phpBB:  
<http://forum.kvarkadabra.net/viewtopic.php?t=5421>
- POLYESTER FILM CAPACITOR 2A223J 100VDC 22NF 0.022U.* (5. marec 2022). Pridobljeno iz GW guitars & woods: <https://guitarsandwoods.com/polyester-film-capacitor-2a223j100vdc-22nf-0-022u.html>

Rajgelj, T. (5. marec 2022). *O barvi zvoka in zvočni predstavi barv*. Pridobljeno iz dijaški net:  
[https://dijaski.net/gradivo/gla\\_ref\\_barva\\_zvoka\\_01](https://dijaski.net/gradivo/gla_ref_barva_zvoka_01)

Woodford, C. (5. marec 2022). *The physics of electric guitars*. Maribor, Maribor, Slovenija.

Žalar, Z. (2005). *Osnove elektrotehnike II*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.