

# Dizajn elektroničkog glazbenog instrumenta bez dodira

---

**Popeškić, Aurora**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:659532>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**Dizajn elektroničkog glazbenog instrumenta bez dodira**

Rijeka, srpanj 2024.

Aurora Popeškić

0069089558

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**Dizajn elektroničkog glazbenog instrumenta bez dodira**

Mentor: prof. dr. sc. Miroslav Vrankić

Komentor: V. asist. dr. sc. Ivan Markovinović

Rijeka, srpanj 2024.

Aurora Popeškić

0069089558

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za automatiku i elektroniku**  
Predmet: **Elektronika II**  
Grana: **2.03.03 elektronika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Aurora Popeškić (0069089558)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Dizajn elektroničkog glazbenog instrumenta bez dodira / Design of a touchless electronic musical instrument**

### Opis zadatka:

Analizirati princip rada teremina, elektroničkog glazbenog instrumenta koji se svira bez dodira. Dizajnirati funkcionalni teremin koji bi trebao imati mogućnost kontrole visine tona i glasnoće bez dodira, koristeći ruke svirača i njihovu udaljenost od antena. Detaljno opisati korištene metode, komponente i radni princip teremina. Usporediti predloženo rješenje s drugim postojećim pristupima u izradi teremina i razmotriti prednosti i nedostatke.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Aurora P.*  
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

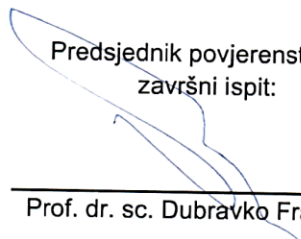
Mentor:



---

Prof. dr. sc. Miroslav Vrankić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



---

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Izjavljujem da sam sukladno Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci samostalno izradila završni rad prema zadatku preuzetom dana 20. ožujka 2023.

Rijeka, srpanj 2024.

*Aurora P.*

---

Aurora Popeškić

0069089558

## **SADRŽAJ:**

<b>1. UVOD</b> .....	6
<b>2. GLAVNE KOMPONENTE I METODE FUNKCIONIRANJA TEREMINA</b> .....	7
<b>2.1. Operacijska pojačala</b> .....	7
2.1.1. Operacijska pojačala s povratnom vezom .....	8
<b>2.2. Oscilatori</b> .....	9
2.2.1. Relaksacijski oscilatori .....	10
<b>3. ARHITEKTURA ELEKTRONIČKOG SKLOPA</b> .....	14
<b>3.1. Oscilatori za visinu tona</b> .....	16
3.1.1. Referentni (neupravljivi) oscilator za visinu tona .....	17
3.1.2. Promjenjivi oscilator za visinu tona .....	18
<b>3.2. Premosni kondenzatori</b> .....	20
<b>3.3. Diferencijalno pojačalo</b> .....	21
<b>3.4. Filter</b> .....	22
<b>3.5. Audio pojačalo</b> .....	23
<b>3.6. Dodatak</b> .....	24
<b>4. ZAKLJUČAK</b> .....	26
<b>LITERATURA</b> .....	27
<b>SAŽETAK</b> .....	28
<b>ABSTRACT</b> .....	29

## 1. UVOD

Leon Theremin (Lev Sergeyevich Termen) je 1920. godine izumio jedan od najneobičajenijih ali i prvih elektroničkih instrumenata „eterofon“ koji je naziv dobio po tome što glazbu praktički proizvodi iz etera, obzirom da za sviranje nije potreban direktan kontakt s instrumentom. Tek je nekoliko godina nakon dobio naziv po svom izumitelju, odnosno „teremin“.

Instrument je razvio tijekom građanskog rata u Rusiji radeći na uređaju kojim bi mogao mjeriti gustoću plina. Uređaj osim što je izmjerenu vrijednost vizualno prikazivao, također je mijenjao visinu tona emitiranog signala razmjerno promjeni gustoće plina. Tijekom rada na uređaju primijetio je kako pomicanjem i odmicanjem ruku od spoja može mijenjati kapacitet i rezonantnu frekvenciju strujnog kruga, odnosno visinu tona izlaznog signala. Iako je spomenuta pojava interferirala sa prvotnom idejom uređaja, Theremin koji je između svega bio glazbenik, dobio je ideju da uređaj pretvori u prvi bezkontaktni instrument.

Theremin je ubrzo dobio priliku predstaviti svoj rad Vladimiru Leninu koji mu, očaran instrumentom, pomaže predstaviti svoj izum svijetu. Theremin nedugo nakon toga počinje nastupati u najpoznatijim dvoranama svijeta čime naglo rastu interes i fascinacija njegovim instrumentom među glazbenicima radi njegovog jedinstvenog zvuka, ali i znanstvenicima poput npr. Alberta Einsteina koji je inspiriran tereminom krenuo proučavati povezanost između geometrije i glazbe.

Thereminov idući plan je bio uspostaviti masovnu proizvodnju instrumenta i time steći bogatstvo ali osim što je bio skupocjen, instrument je bio iznimno težak za svirati budući da glazbenik tonovima manipulira samo prema sluhu. [1]

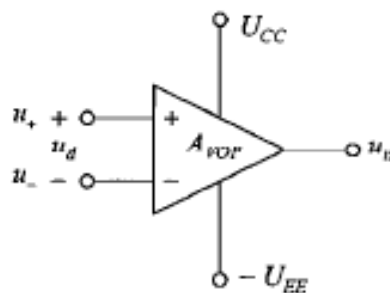
Za popularizaciju teremina uvelike je zaslužan Robert Moog koji je već sa 14 godina napravio svoju verziju teremina koristeći se tranzistorskim spojevima umjesto vakuumskih cijevi, te je do 19. godine krenuo u proizvodnju i prodaju istih. Danas su Moog teremini jedni od najpoznatijih te najcjepjenijih izvedbi teremina. [2]

## 2. GLAVNE KOMPONENTE I METODE FUNKCIONIRANJA TEREMINA

### 2.1. Operacijska pojačala

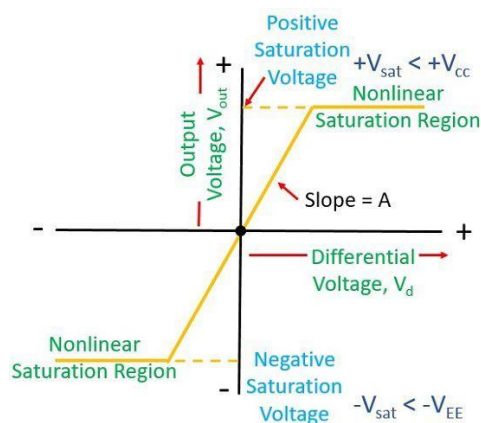
Operacijska pojačala su složeni elektronički sklopovi koji služe za pojačanje ulaznog naponskog signala. Sastoje se od komponenti poput otpornika, kondenzatora i tranzistora koji se nalaze monolitno integrirani na silicijskom čipu. Naziv su dobila zbog toga što mogu izvoditi različite operacije poput zbrajanja, oduzimanja, deriviranja, integriranja i pojačanja ulaznog signala.

Ključne karakteristike koje definiraju njihove performanse jesu pojačanje, širina frekvencijskog pojasa, linearnost, šum te ulazna i izlazna impedancija.



Slika 2.1. Operacijsko pojačalo [3]

Kao što je prikazano na slici 1., operacijska pojačala se sastoje od dva ulaza na koje se dovodi signal, izvora istosmjernog napona te jednog izlaza. Neinvertirajući ulaz pojačala se označava oznakom „+“ te je u fazi s izlaznim naponom  $u_{iz}$  dok se invertirajući označava oznakom „-“ te je zakrenut u fazi za  $180^\circ$ .



Slika 2.2. Prijenosna karakteristika operacijskih pojačala [4]



Naponi napajanja označeni su oznakama  $U_{CC}$  i  $-U_{EE}$  a radi jednostavnosti električnih shema ih obično ne crtamo. Definiiraju maksimalni izlazni napon te ga ograničavaju u području od  $U_{IZmin}$  do  $U_{IZmax}$ . Jednom kada se dosegne maksimalna vrijednost izlaznog napona, daljnjim povećanjem ulaznog napona  $u_D$  pojačalo ulazi u zasićenje te izlazni napon postaje konstantan.

Naponsko pojačanje se računa prema izrazu (2.1.):

$$A_{VOP} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \quad (2.1.) \quad [5]$$

Gdje je:

$u_{iz}$  – iznos izlaznog napona

$u_{ul}$  – iznos ulaznog napona

Izlazni napon računamo prema izrazu (2.2.):

$$u_{IZ} = A_{VOP}(u_+ - u_-) \quad (2.2.)$$

odnosno umnoškom naponskog pojačanja operacijskog pojačala  $A_{VOP}$  i razlike neinvertirajućeg  $u_+$  i invertirajućeg  $u_-$  ulaznog naponskog signala.

Za linearno područje prijenosne karakteristike gdje vrijedi  $|u_D| < \frac{u_{IZmax}}{A_{vop}}$  operacijsko pojačalo radi kao pojačalo, a kada se dosegne maksimalna vrijednost izlaznog napona daljnjim povećanjem ulaznog napona  $u_D$  pojačalo ulazi u stanje zasićenja te izlazni napon postaje konstantan. Operacijsko pojačalo će tada djelovati kao komparator odnosno uspoređivati će napone ulaznih signala i na izlazu dati signal za periode kada je napon  $u_+$  pozitivniji od napona  $u_-$ .

### 2.1.1. Operacijska pojačala s povratnom vezom

Povratna veza se najčešće radi s pasivnim elementima tj. otpornicima, zavojnicama i kondenzatorima te može biti pozitivna i povećavati izlazni signal ili negativna i smanjivati ga. Kod pojačala s povratnom vezom izlazni signal se vraća na ulaz gdje se uspoređuje s ulaznom veličinom, tako se kod negativne povratne veze izlazni signal vraća na invertirajući „-“ pin a kod pozitivne na neinvertirajući „+“ pin.

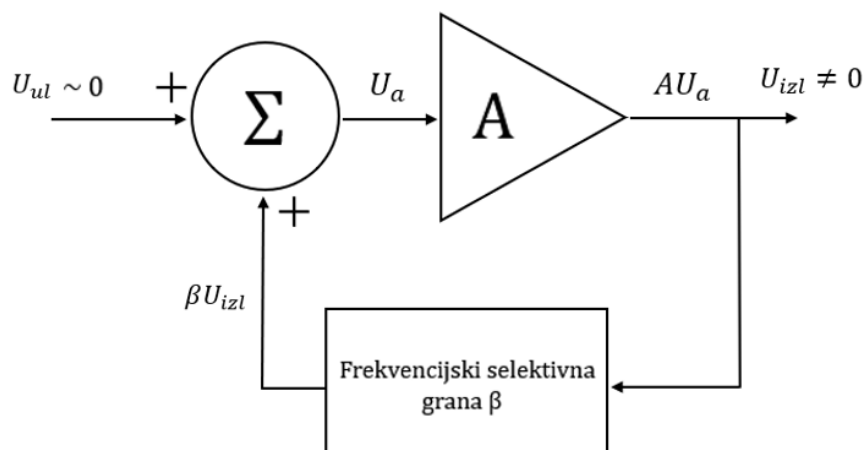
Negativna povratna veza ima široku primjenu u audiotehnici jer iako smanjuje pojačanje sklopa, istovremeno smanjuje nelinearna izobličenja i stabilizira pojačanje, omogućava reguliranje povećanja signala kako bi izbjegli stanje zasićenja, povećava širinu frekvencijskog pojasa te

zapravo približava pojačalo karakteristikama idealnog pojačala. Također omogućava uklanjanje šumova budući da će se spomenuti šum negativnom povratnom vezom obrnute faze vratiti na ulaz i poništiti neželjeni signal.

Korištenjem pozitivne povratne veze imamo mogućnost signal beskonačno pojačavati. Međutim, zajedno sa signalom se pojačavaju i neželjena nelinearna izobličenja signala koja ne možemo regulirati radi čega sklop lako može doći u stanje zasićenja.

## 2.2. Oscilatori

Oscilatori su elektronički sklopovi koji generiraju napone periodičnih valnih oblika. Poznajemo harmonijske oscilatore koji generiraju sinusne signale te relaksacijske oscilatore koji generiraju periodičke izlazne signale trokutastog i pravokutnog valnog oblika.



Slika 3. Blok shema oscilatora

Gdje je:

$\beta$  – koeficijent povratne veze

$U_a$  – zbroj ulaznog signala i signala frekvencijski selektivne grane

$A$  – pojačanje pojačala,  $A(j\omega) = \frac{U_{IZL}}{U_a}$  (2.2.)

Ukupno pojačanje sklopa se računa prema izrazu (2.3.):

$$A_f(j\omega) = \frac{U_{IZL}}{U_{UL}} = \frac{U_a \cdot A(j\omega)}{U_a - \beta U_{IZL}} = \frac{U_a \cdot A(j\omega)}{U_a \cdot (1 - A(j\omega)\beta(j\omega))} = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)\beta(j\omega)} = \frac{A(j\omega)}{1 - T(j\omega)} \quad (2.3.) [6]$$

$T(j\omega)$  – pojačanje u petlji povratne veze

Oscilatori generiraju izlazne signale konstantnih amplituda i frekvencija ukoliko je zadovoljen Barkhausenov kriterij stabilnosti koji zahtjeva da se signal prolaskom kroz pojačalo i granu povratne veze na ulaz vraća s istom fazom i amplitudom, odnosno  $|T(j\omega_0)| = 1, \angle T(j\omega_0) = 0^\circ$ .

Sklop će oscilirati samo s frekvencijom na kojoj je produkt faktora povratne veze i pojačanja pojačala jednak 1 tj. mora vrijediti sljedeće:

$$1 - T(j\omega) = 0 \quad (2.4.)$$

$$A_f(j\omega) = \frac{U_{IZL}}{U_{UL}} = \frac{A(j\omega)}{0} = \infty \quad (2.5.)$$

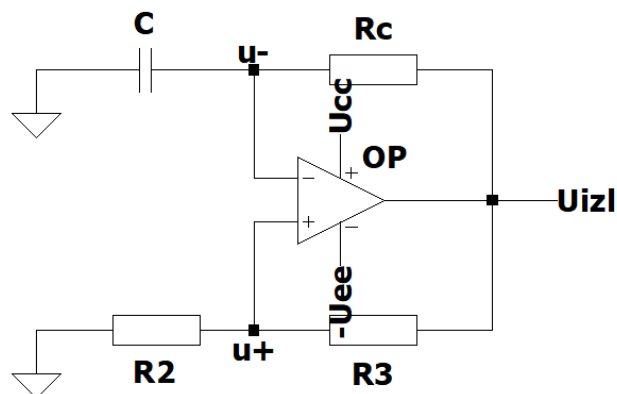
Budući da je pojačanje u petlji povratne veze frekvencijski ovisno, ovo će vrijediti samo za jednu frekvenciju odnosno frekvenciju osciliranja  $\omega_0$ .

### 2.2.1. Relaksacijski oscilatori

Relaksacijski oscilator koristimo za realizaciju oba oscilatora u spoju, tj. promjenjivog i nepromjenjivog. Sastoji se od nelinearnih elemenata poput tranzistora i operacijskih pojačala te komponenti koje nam služe kao spremnik energije poput kondenzatora ili zavojnica. Energija se razmjenjuje između aktivnih i pasivnih elemenata te je frekvencija osciliranja određena vremenom punjenja i pražnjenja kondenzatora.

RC oscilatori se obično koriste u niskofrekvencijskim sklopovima zbog njihove nestabilnosti i loše kvalitete signala pri visokim frekvencijama.

Na slici 4. prikazana je shema relaksacijskog oscilatora realiziranog pomoću Schmittovog okidača i RC kruga.



Slika 4. Relaksacijski oscilator (LTspice)

Schmittov okidač je komparatori sklop s histerezom dobiven primjenom pozitivne povratne veze između neinvertirajućeg komparatora i dvaju otpornika te je najčešće korištena izvedba komparatora.

Glavno svojstvo Schmittova okidača jest histereza tj. stanje sustava u kojem izlazni signal ovisi o prijašnjim vrijednostima ulaznog signala. Zahvaljujući dva praga (granične naponske vrijednosti) koje signal treba preći kako bi se promijenilo stanje signala, na izlazu dobivamo signal bez naglih oscilacija uzrokovanih šumovima i neželjenim smetnjama. Schmittov okidač ima bistabilno djelovanje, dakle kada signal pređe gornji prag izlazni signal poprima pozitivnu vrijednost a negativnu kada signal pređe donji prag.

U ovom spoju operacijsko pojačalo radi kao komparator tj. uspoređuje iznose napona ulaznih signala te ovisno o njima daje izlazni signal. Ako odredimo da naponi napajanja iznose  $U_{CC} = 12V$  i  $-U_{EE} = -12V$ , za  $u_+ > u_-$  ćemo na izlazu imati  $U_{izl} = 12V$  a za  $u_- > u_+$   $U_{izl} = -12V$ .

Sklop krećemo promatrati od trenutka  $t = 0s$  kada je kondenzator prazan tj.  $U_C = 0V$ ,  $u_- = 0V$ . Otpornici  $R_2$  i  $R_3$  su jednakih iznosa,  $R_2 = R_3$ , čime dolazimo do jednakosti za vrijednost ulaznog naponskog signala  $u_+ = \beta U_{izl} = \frac{R_2}{R_2+R_3} * U_{izl} = \frac{1}{2} U_{izl} = 6V$ .

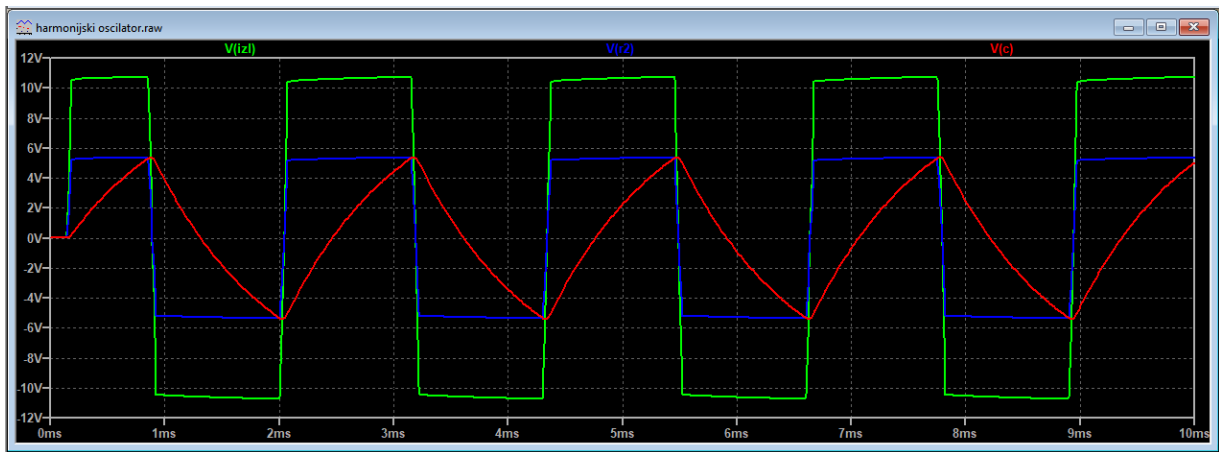
Kako je u ovom slučaju  $u_+ > u_-$ , na izlazu imamo signal  $U_{OUT} = 12V$ . Kondenzator se kreće puniti te kada dosegne graničnu vrijednost od  $u_c = 6V$ , iznos napona invertirajućeg pina je veći od neinvertirajućeg,  $u_- > u_+$ , pa na izlazu imamo  $U_{izl} = -12V$ .

Sada neinvertirajući terminal mijenja polaritet zbog izlaznog signala koji se povratnom vezom vraća na neinvertirajući terminal, dakle  $u_+ = -6V$ . Kondenzator se kreće prazniti do  $-6V$  te kada vrijednost napona na kondenzatoru padne ispod  $-6V$ , iznos napona na neinvertirajućem pinu  $u_+$  postaje veći od iznosa na invertirajućem pinu  $u_-$ . Izlazni signal će ponovno iznositi  $12V$  te će se ciklus nastaviti ponavljati kao što možemo vidjeti na grafičkom prikazu dobivenom u programu LTspice na slici 5., uz manja odstupanja izlaznih vrijednosti, gdje je:

V(izl) – izlazni napon

V(r2) – napon na otporniku  $R_2$ , tj. napon na neinvertirajućem pinu  $u_+$

V(c) – napon na kondenzatoru C, tj napon na invertirajućem pinu  $u_-$



Slika 5. Naponi u spoju harmonijskog oscilatora (LTspice)

Frekvencija promjenjivog oscilatora tona se može mijenjati pomicanjem ruke u blizini antene. Kako su naša ruka i antena kapacitivno povezane, koristimo promjenu kapaciteta zbog pomicanja ruke za generiranje određenog frekvencijskog raspona.

Heterodiniranjem odnosno kombiniranjem signala oscilatora konstantne frekvencije te oscilatora promjenjive frekvencije dobivamo izlazni signal u rasponu od 0 Hz pa do maksimalnog pada frekvencije varijabilnog oscilatora tj. do one frekvencije koju mi našom rukom „namjestimo“. Heterodin koji je dobiven oduzimanjem tih dvaju signala jest ujedno i zvuk koji teremin proizvodi.

Kao što smo već spomenuli, frekvencija je određena komponentama strujnog kruga te ju možemo izračunati izjednačavanjem pozitivne i negativne granične vrijednosti.

Napon na kondenzatoru kroz vrijeme računamo prema izrazu:

$$U_c(t) = U_s(1 - e^{-\frac{t}{T}}) = U_s - U_s e^{-\frac{t}{R_c C}} \quad (2.8.) \quad [7]$$

Gdje je:

$U_c(t)$  – iznos napona na kondenzatoru u vremenu  $t$

$U_s$  – maksimalna vrijednost izlaznog napona određena naponom napajanja

Iznose napona pragova računamo prema izrazu (2.9.):

$$U_{prag} = \pm U_s \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (2.9.) \quad [8]$$

Promatranjem sklopa nakon prijelazne pojave kada je početna vrijednost kondenzatora jednaka naponu praga te korištenjem relacija (2.8.) i (2.9.) dolazimo do izraza u produžetku (2.10.):

$$U_S * \frac{R_2}{R_2+R_3} = U_S - \left( U_S * \left( 1 + \frac{R_2}{R_2+R_3} \right) \right) * e^{\frac{-t}{R_C C}} \quad (2.10.)$$

$$\frac{R_2}{R_2+R_3} = 1 - \left( 1 + \frac{R_2}{R_2+R_3} \right) * e^{\frac{-t}{R_C C}} \quad (2.11.)$$

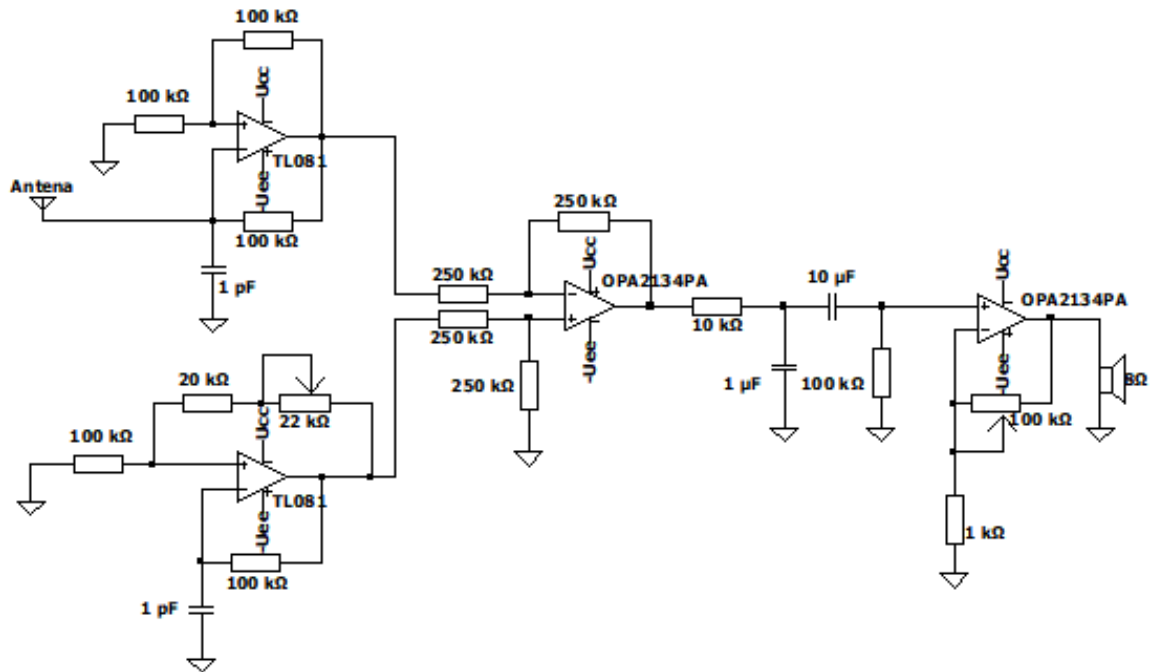
$$\frac{1 - \frac{R_2}{R_2+R_3}}{1 + \frac{R_2}{R_2+R_3}} = e^{\frac{-t}{R_C C}} \quad (2.12.)$$

$$\ln \left( \frac{1 - \frac{R_2}{R_2+R_3}}{1 + \frac{R_2}{R_2+R_3}} \right) = \frac{-t}{R_C C} \quad (2.13.)$$

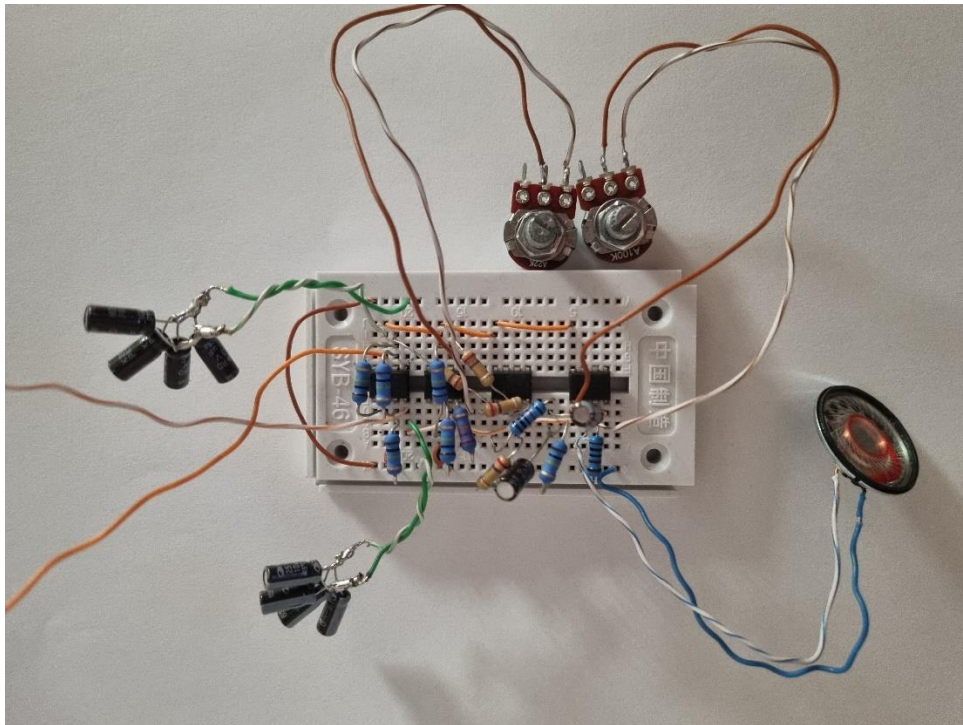
$$t = -R_C C * \ln \left( \frac{1 - \frac{R_2}{R_2+R_3}}{1 + \frac{R_2}{R_2+R_3}} \right) = R_C C * \ln \left( \frac{1 + \frac{R_2}{R_2+R_3}}{1 - \frac{R_2}{R_2+R_3}} \right), T = 2t \quad (2.14.)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_C C * \ln \left( \frac{1 + \frac{R_2}{R_2+R_3}}{1 - \frac{R_2}{R_2+R_3}} \right)} = \frac{1}{2R_C C \ln(3)} \quad (2.15.)$$

### 3. ARHITEKTURA ELEKTRONIČKOG SKLOPA



Slika 6. Shema elektroničkog spoja teremina [9]



Slika 7. Elementi sheme spojeni na eksperimentalnu pločicu

Za spajanje sklopa korištene su sljedeće komponente:

1. Operacijska pojačala:
  - 2x TL081
  - 2x OPA2134PA
2. Otpornici:
  - 6x 100 k $\Omega$
  - 4x 270 k $\Omega$
  - 2x 1 k $\Omega$
  - 1x 20 k $\Omega$
3. Kondenzatori:
  - 5x 10  $\mu$ F
  - 5x 1  $\mu$ F
  - 2x 1 pF
4. Potenciometri (linearni):
  - 1x 22 k $\Omega$
  - 1x 100 k $\Omega$
5. Ostalo:
  - Eksperimentalna pločica
  - Bakrene žice
  - Antena
  - Napajanje 12V
  - Zvučnik 8  $\Omega$
  - Bakrena pločica kao masa



### 3.1. Oscilatori za visinu tona

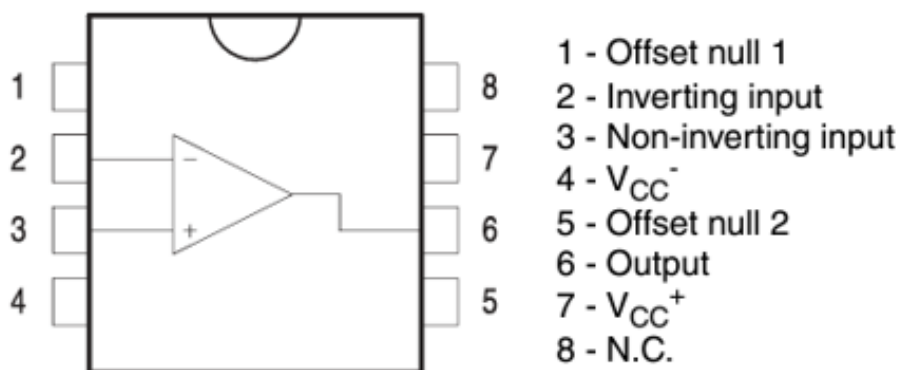
Visina tona podrazumijeva frekvenciju sinusnog signala, tj. broj oscilacija u jedinici vremena koje neki izvor zvuka proizvodi, tako signali veće frekvencije imaju viši ton.

No, osim visine i glasnoće, postoji i boja tona koja je određena višim harmonicima. Složeni tonovi se sastoje od više frekvencija, ona najniže frekvencije se naziva osnovnim (prvim) harmonikom dok su ostali tonovi cjelobrojni višekratnici frekvencije osnovnog harmoničkog člana koji se još nazivaju alikvotni tonovi.

Zbrajanjem dva signala zbrajamo i njihove harmonike kao i tonove zbroja između harmonika ili tonove razlike iznad i ispod sviranih tonova, te signal ne mora biti u harmoničkom odnosu prema osnovnim tonovima. Tako je naše uho npr. najosjetljivije na treći harmonik. Uklanjanje ili smanjivanje harmonika je osim metodama poput širinsko-impulsne modulacije moguće i korištenjem filtera. [10]

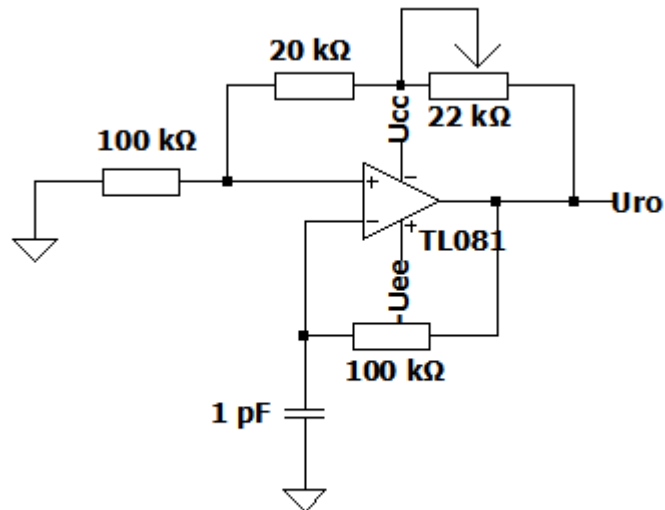
Za upravljanje visinom tona teremina koristimo dva relaksacijska oscilatora koji rade u visokofrekvencijskom području. Prvi oscilator jest referentni oscilator koji konstantno emitira signal jednake frekvencije, a drugi oscilator je promjenjivi oscilator koji mijenja frekvenciju ovisno o položaju naše ruke.

Za realizaciju oscilatora koristimo JFET operacijska pojačala TL081. Ono je pojačalo opće namjene, dolazi u DIP-8 kućištu te ga karakterizira mala ulazna struja i struja pomaka kao i niska razina harmoničnog izobličenja i šuma.



Slika 8. Raspored pinova TL081 [11]

### 3.1.1. Referentni (neupravljivi) oscilator za visinu tona



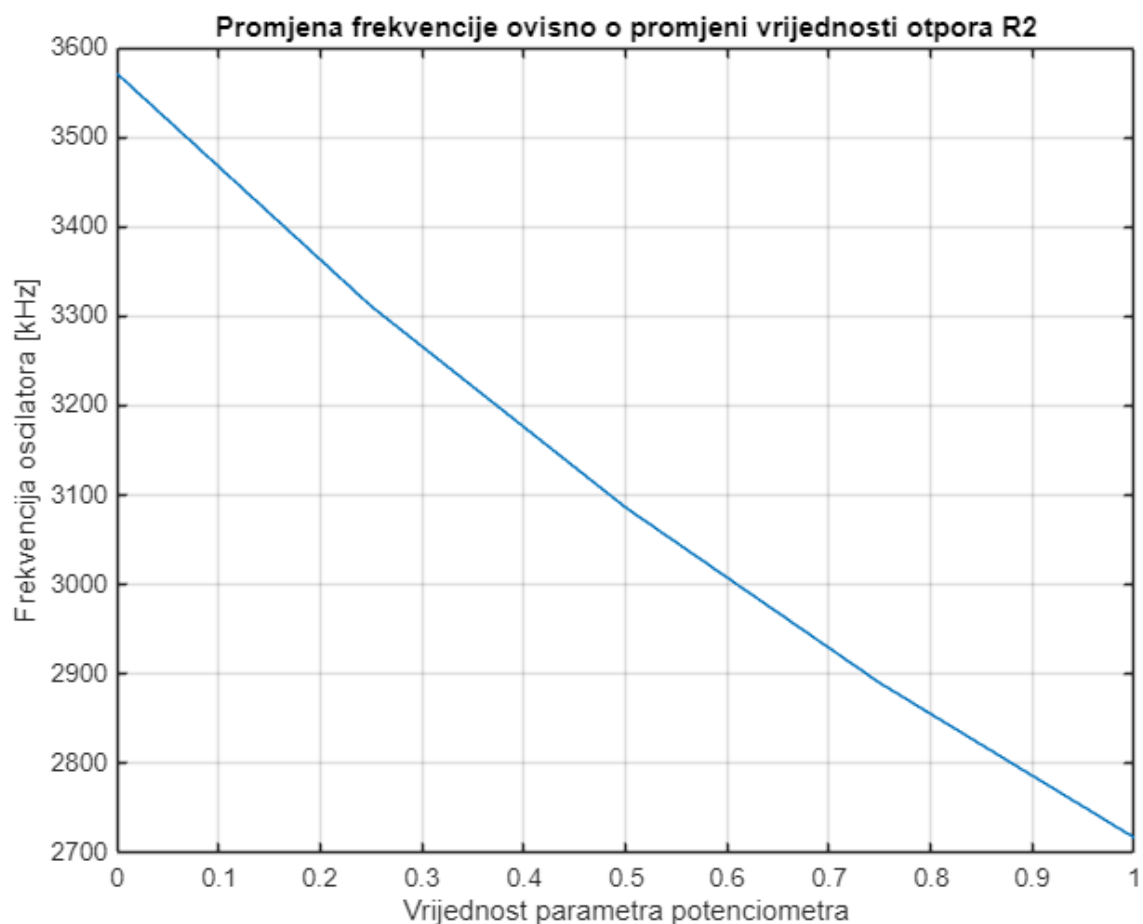
Slika 9. Neupravljivi oscilator visine tona (LTspice)

Neupravljivi oscilator konstantne frekvencije nam omogućuje da heterodiniranjem dobijemo signal koji je unutar našeg čujnog područja. Imajući na umu nesavršenost komponenti te učinak vanjskih čimbenika na mjerenja, moramo osigurati potencijometar kojim ćemo moći namjestiti oscilator na željenu frekvenciju. U tu svrhu korišten je potencijometar od 22 kΩ.

Osim što potencijetrom možemo regulirati vrijednost graničnog napona, također možemo mijenjati vrijednost frekvencije oscilatora prema formuli frekvencije relaksacijskog oscilatora:

$$f_{ro} = \frac{1}{2R_1 C \ln\left(\frac{1 + \frac{R_2}{R_2 + R_3}}{1 - \frac{R_2}{R_2 + R_3}}\right)} = \frac{1}{2 * 100k\Omega * 1pF * \ln\left(\frac{1 + \frac{20k\Omega + a(22k\Omega)}{120k\Omega + a(22k\Omega)}}{1 - \frac{20k\Omega + a(22k\Omega)}{120k\Omega + a(22k\Omega)}}\right)}, a \in [0, 1] \quad (3.1.)$$

Na slici 10. možemo vidjeti grafički prikaz promjene frekvencije ovisno o promjeni vrijednosti otpora realiziran u programu MATLAB.



*Slika 10. Promjena frekvencije ovisno o promjeni vrijednosti potenciometra*

### 3.1.2. Promjenjivi oscilator za visinu tona

Kao što je već spomenuto, promjenjivi oscilator za visinu tona mijenja frekvenciju ovisno o položaju naše ruke koja predstavlja jednu ploču kondenzatora a antena drugu.

Vodeći se formulama za kapacitet kondenzatora i frekvenciju relaksacijskog oscilatora možemo zaključiti da što je manja udaljenost između naše ruke i antene, to je veći kapacitet kondenzatora a frekvencija osciliranja je manja. Ako je frekvencija osciliranja manja, heterodin signala dvaju oscilatora će biti veće frekvencije te će time ton izlaznog audio signala biti viši.

Formula za kapacitet pločastog kondenzatora glasi:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (3.2.)$$

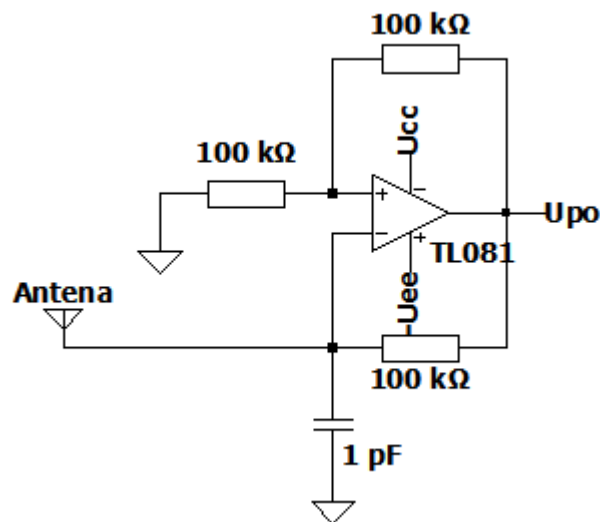
Gdje je:

$\varepsilon_0$  – dielektrična permitivnost vakuuma

$\varepsilon_r$  – relativna dielektrična permitivnost

S – površina ploča kondenzatora

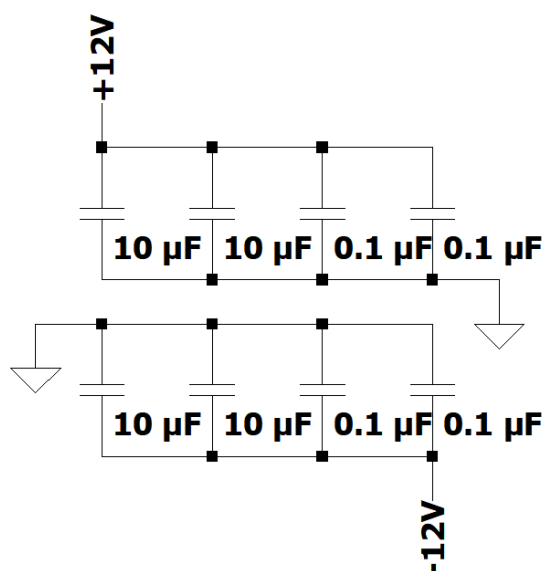
d – udaljenost ploča kondenzatora



Slika 11. Promjenjivi oscilator visine tona (LTspice)

Kada se ne nalazimo blizu antene izlazna frekvencija oscilatora iznosi jednako koliko i konstantna frekvencija neupravljivog oscilatora kako bi u tom trenutku njihov heterodin, odnosno razlika njihovih signala, iznosila 0.

### 3.2. Premosni kondenzatori



Slika 12. Premosni kondenzatori (LTspice)

Premosni kondenzatori se koriste za filtriranje izmjenične komponente iz istosmjernog signala i održavanje vrijednosti ulaznog signala. Spojeni su na masu i na naponski izvor.

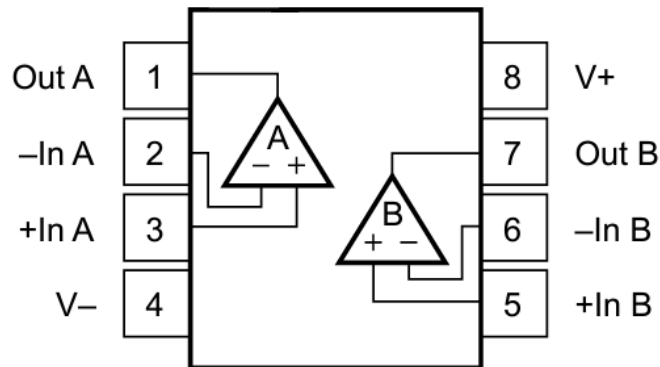
Koriste se kondenzatori malog kapaciteta budući da imaju manji induktivitet te mogu brže reagirati i stabilizirati propad ulaznog naponskog signala.

Kondenzatori u spoju ne moraju biti istih vrijednosti već se biraju ovisno o željenom ishodu. Standardne vrijednosti kapaciteta premosnih kondenzatora su  $0.1\mu\text{F}$  i  $10\mu\text{F}$  koje su korištene u izradi ovog sklopa. Kondenzator kapaciteta  $0.1\mu\text{F}$  služi za filtriranje visokih frekvencija dok kondenzator kapaciteta  $10\mu\text{F}$  ima ulogu male punjive baterije koja služi za reguliranje stabilnosti signala.

Premosni kondenzatori su na eksperimentalnu pločicu spojeni na način da su u prvoj grupi paralelnih kondenzatora pozitivne priključnice spojene na ulazni  $U_{cc}$  signal dok su negativne spojene na uzemljenje na rubu pločice, a u drugom dijelu negativne priključnice su spojene na  $-U_{ee}$  signal dok su pozitivne uzemljene.

### 3.3. Diferencijalno pojačalo

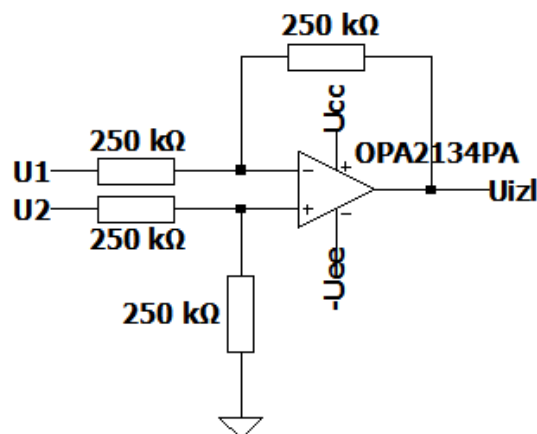
Za realizaciju diferencijalnog i audio pojačala je korišteno dvostruko operacijsko pojačalo OPA2134PA tipa FET. Dolazi u DIP-8 kućištu i često se koristi u audio pojačalima, karakterizira ga niska razina harmoničnog izobličenja, niska razina šuma te velika brzina i stabilnost. Dolazi u DIP-8 kućištu te se često koristi u audio pojačalima.



Slika 12. Raspored pinova OPA2134PA [12]

Operacijsko pojačalo u spoju kao na slici 13. naziva se diferencijalno pojačalo. Zbog jednostavnosti se inače uzima da su  $R_1 = R_3$  i  $R_2 = R_4$ . U tom slučaju na izlazu imamo signal  $U_{izl} = (U_2 - U_1) * \frac{R_2}{R_1}$  (3.3.).

Kako bi nam izlazni signal bio jednak razlici izlaznih signala promjenjivog i nepromjenjivog oscilatora, u spoju su korišteni otpornici jednake vrijednosti. Tako izlazni signal iznosi  $U_{izl} = U_2 - U_1$  te se, za razliku od ulaznih signala, nalazi unutar našeg praga čujnosti. Prije nego signal dođe do audio pojačala mora proći kroz filter gdje ćemo mu ograničiti frekvencijski opseg.

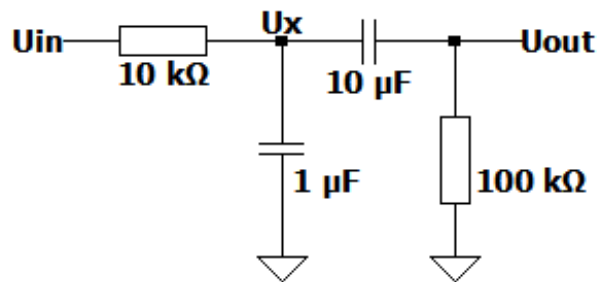


Slika 13. Shema diferencijalnog pojačala (LTspice)

### 3.4. Filter

Filter korišten pri izradi teremina jest kombinacija niskopropusnog i visokopropusnog filtera. Visokopropusni filter propušta samo signale visokih frekvencija dok suzbija one niskih frekvencija, a niskopropusni filter propušta samo signale niskih frekvencija dok suzbija one visokih frekvencija. Kombiniranjem tih dvaju filtera dobivamo pojasni filter koji će propuštati signale samo određenog frekvencijskog opsega.

U ovom spoju konkretno, filter osim što ograničava frekvencijski opseg, isto tako uklanja štetne harmonike i poboljšava kvalitetu signala. Pojasni filteri se često koriste u obradi audio signala, npr. kod ekvalizatora koji nam služi za upravljanje frekvencijama zvučnog signala u svrhu poboljšanja kvalitete istog. [13]



Slika 13. Pojasni filter (LTspice)

Graničnu frekvenciju računamo kao omjer izlaznog (filtriranog) i ulaznog signala. Kako bi lakše došli do izraza podijeliti ćemo filter na dva dijela tj. na visokopropusni i niskopropusni te na kraju kombinirati dvije jednadžbe kako bi dobili rješenje:

$$U_x = I * \frac{1}{sC_1} \rightarrow I = sC_1 * U_x \quad (3.4.)$$

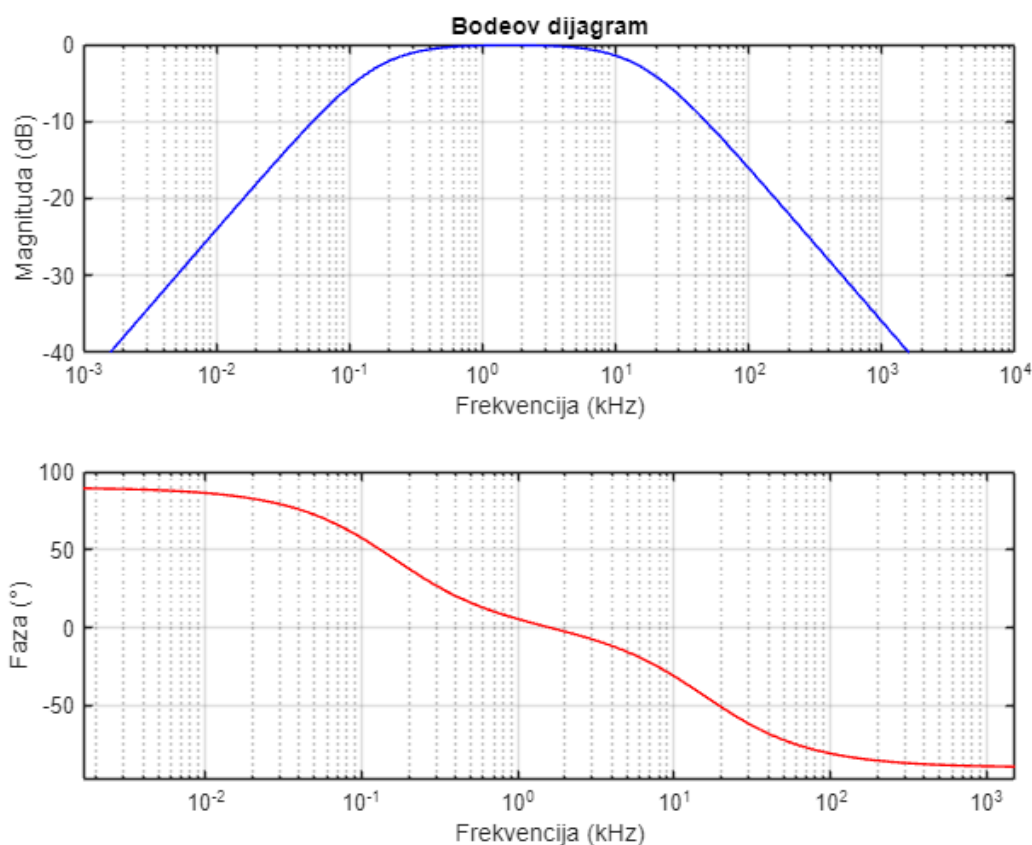
$$U_{in} = I * R_1 + U_x \rightarrow U_{in} = U_x * (sC_1R_1 + 1) \quad (3.5.)$$

$$U_{out} = I * R_2 \rightarrow I = U_{out} * \frac{1}{R_2} \quad (3.6.)$$

$$U_x = I * \frac{1}{sC_2} + U_{out} \rightarrow U_x = U_{out} * \left( \frac{1}{sR_2C_2} + 1 \right) = U_{out} * \frac{sR_2C_2 + 1}{sR_2C_2} \quad (3.7.)$$

$$H(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{sR_2C_2}{(sR_2C_2 + 1)(sR_1C_1 + 1)} = \frac{s}{(s+1)(0.01s+1)} \quad (3.8.)$$

Bodeov dijagram dobivene prijenosne funkcije  $H(s)$  prikazane u Laplaceovoj domeni, odnosno frekvencijski opseg sklopa, možemo vidjeti na dijagramu dobivenom u programu MATLAB na slici 14.:



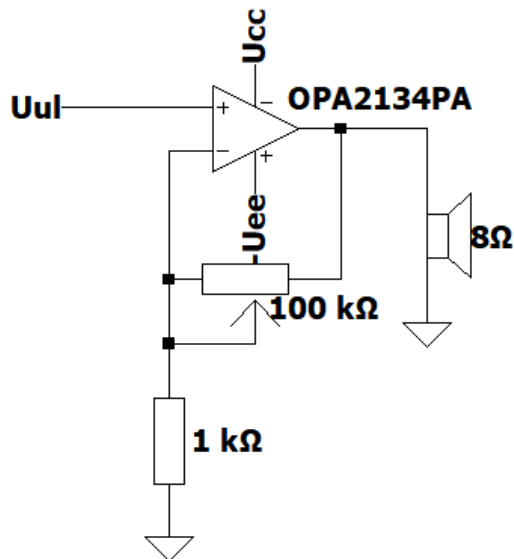
Slika 14. Bodeov dijagram pojašnjog filtera

### 3.5. Audio pojačalo

Kao što smo već spomenuli, kao audio pojačalo smo koristili operacijsko pojačalo OPA2314PA. Na pojačalo je negativnom povratnom vezom spojen potenciometar od 100 k $\Omega$  kojim reguliramo amplitudu signala, te zvučnik na sam izlaz pojačala. Što je veća amplituda signala, to će signal biti glasniji.

Potenciometar se sastoji od dvije krajnje priključnice između kojih je vrijednost otpornika jednaka ukupnom otporu potenciometra te srednje priključnice koja je spojena na kliznik kojim mijenjamo vrijednost otpora. Može se koristiti kao naponsko djelilo ili kao reostat. U realizaciji sklopa su korišteni potenciometri spojeni kao reostati, tj. klizni otpornici, budući da su za spajanje korištene samo dvije priključnice.





Slika 15. Audio pojačalo

Ovisnost izlaznog signala operacijskog pojačala prikazanog na slici 15. o iznosu otpora potencijometra možemo prikazati izrazom (3.9.):

$$u_- = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + a \cdot 100k\Omega} u_{izl}, \quad a \in [0, 1] \quad (3.9.)$$

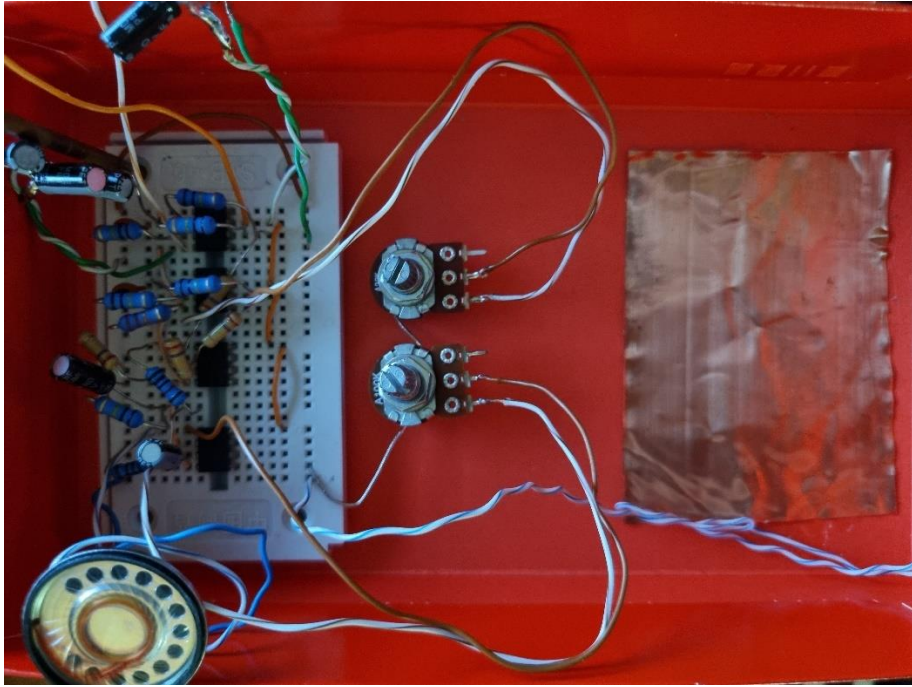
Dakle izraz za naponsko pojačanje glasi (3.10.):

$$A_{VOP} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{1k\Omega + a \cdot 100k\Omega}{1k\Omega} = 1 + \frac{a \cdot 100k\Omega}{1k\Omega}, \quad a \in [0, 1] \quad (3.10.)$$

Parametar  $a$  označava položaj kliznika o kojem ovisi iznos otpora između prve i druge priključnice. Kada je položaj kliznika na samom početku te parametar  $a$  iznosi 0, negativnom povratnom vezom se na invertirajući pin vraća signal jednak izlaznom ali zakrenut u fazi za  $180^\circ$  radi čega će izlazni signal sada iznositi 0V odnosno sklop će biti utišan. Pomicanjem kliznika tj. povećanjem vrijednosti otpora povećavamo amplitudu izlaznog signala.

### 3.6. Dodatak

Osim dijelova opisanih kroz treće poglavlje te vidljivih na slici 7., koristili smo bakrenu pločicu vidljivu na slici 8. kao masu i zalemili oklope dvaju potencijometra te ih spojili na masu kako bi eliminirali šumove. Najčešće se u ovu svrhu koristi bakar zbog njegove dobre vodljivosti i pristupačne cijene.



Slika 8. Spajanje mase na eksperimentalnu pločicu

## 4. ZAKLJUČAK

Teremin je jedan od jednostavnijih elektroničkih sklopova koje možemo samostalno izraditi, no istovremeno fascinantan uzmemo li u obzir da bez ulaznog signala sklop uspješno proizvodi izlazni signal.

Zbog jednostavnosti te mogućnosti izrade elektroničkog sklopa, teremin izrađen za ovaj završni rad sadrži samo jednu antenu kojom se manipulira visinom tona, dok se glasnoća regulira potencijometrom. U izradi sklopa su korišteni samo RC oscilatori koji su jeftiniji i jednostavniji ali lošijih karakteristika u usporedbi s LC oscilatorima. Isto tako, umjesto tranzistorskih spojeva koji su prisutni u većini pomalo zastarjelih shematskih prikaza teremina dostupnih na internetu, u svrhu realizacije oscilatora su korištena operacijska pojačala. No unatoč manjim izmjenama, sama ideja te princip funkcioniranja sklopa su jednaki.

Sklop je funkcionalan te uspješno dizajniran zbog čega se ovisno o položaju naše ruke u odnosu na antenu mijenja visina tona izlaznog zvučnog signala. Međutim, napravljeni sklop nije prikaz punog potencijala i mogućnosti teremina budući da je sklop pojednostavljen te nije na razini teremina poznatih proizvođača ili onih korištenih u filmovima i glazbi.

## LITERATURA

- [1] BBC: „The theremin: The strangest instrument ever invented?“, s interneta, <https://www.bbc.com/culture/article/20201111-the-theremin-the-strangest-instrument-ever-invented>, 20.06.2024.
- [2] Moog Music: „Dr. Robert Moog“, s interneta, <https://www.moogmusic.com/news/dr-robert-moog>, 02.07.2024.
- [3] Butković, Ž.; Divković Pukšec, J.; Barić, A.: „Elektronika 1, I. dio“, Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave, Zagreb, 2006
- [4] Butković, Ž.: „Elektronika 2“, Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave, Zagreb 2011.
- [5] Electronics coach: „Operational Amplifiers“, s interneta, <https://electronicscoach.com/operational-amplifiers-op-amp.html>, 20.06.2024.
- [6] Analog Circuit Design: „Barkhausen Criterion for Sustained oscillations“, <https://analogcircuitdesign.com/barkhausen-criterion/>, 25.06.2024.
- [7, 8] All About Circuits: „Exactly How Schmitt Trigger Oscillators Work“, s interneta, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/exactly-how-schmitt-trigger-oscillators-work/>, 28.06.2024.
- [9] Bourke, F.: „ModCon Final Project: Theremin“, završni rad, Olin College of Engineering, Needham, MA, 2012.
- [10] T. Jelaković: „Zvuk, sluh, arhitektonska akustika“, Školska Knjiga, Zagreb, 1978.
- [11] STMicroelectronics: „TL081“, s interneta, <https://www.st.com/en/amplifiers-and-comparators/tl081.html>, 30.06.2024.
- [12] Texas Instruments: „OPAx134 SoundPlus High Performance Audio Operational Amplifiers“, s interneta, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2134.pdf>, 30.06.2024.
- [13] Things DAQ: „Band-pass Filter“, s interneta, <https://thingsdaq.org/2022/12/11/band-pass-filter/>, 30.06.2024.

## SAŽETAK

Tema završnog rada je analiza principa rada teremina te dizajniranje i izrada istog. Prvo poglavlje se bavi nastankom teremina i utjecajem instrumenta kroz povijest na glazbenike i znanstvenike. U drugom poglavlju su navedene glavne komponente teremina te su objašnjeni glavni principi funkcioniranja poput heterodiniranja, promjenom kapaciteta i frekvencije ovisno o položaju naše ruke i oscilacija uvjetovanih Barkhausenovim kriterijem stabilnosti. Osim toga, izvodima i formulama, kao i grafičkim i shematskim prikazima izvedenih u programima MATLAB i LTspice, opisan je rad operacijskih pojačala i oscilatora. Detaljnije su opisani relaksacijski oscilatori realizirani pomoću Schmittovog okidača koji su ujedno i korišteni u realizaciji sklopa. U trećem poglavlju je prikazan dizajn elektroničkog sklopa te njegovo spajanje na eksperimentalnu pločicu. Radi lakšeg razumijevanja sklop je podijeljen na 5 dijelova; oscilatori za visinu tona, prenosni kondenzatori, diferencijalno pojačalo, filter i audio pojačalo. Detaljno je opisana funkcija svakog od navedenih dijelova teremina koristeći se vrijednostima korištenih u njegovoj izradi.

**Ključne riječi:** teremin, heterodiniranje, Barkhausenov kriterij stabilnosti, operacijska pojačala, oscilatori, Schmittov okidač

## ABSTRACT

The subject of this paper is analysis of theremin's working principle as well as designing and making one. The first chapter explains the history of theremin and its influence on musicians and scientists. The second chapter describes the main components used to make a theremin, as well as the main principles behind it such as heterodyning, the change of capacitance and frequency caused by changing the position of our hand around the antenna and the conditions for Barkhausen criterion that are necessary for the circuit to oscillate. Other than that, the working principle of operational amplifiers and oscillators is explained with formulas and equations as well as graphical and schematic representations of the system made in MATLAB and LTspice programs. Schmitt trigger relaxations oscillators, which are used in making the theremins oscillation circuit, are explained in detail. The design of a theremin circuit as well as its connecting to a breadboard is shown in the third chapter. For better understanding the circuit is split into five parts; pitch oscillators, bypass capacitors, differential amplifier, filter and audio amplifier. Every part and its function in the circuit is explained in detail using the values used in making the theremin.

**Key words:** theremin, heterodyning, Barkhausen stability criteria, operational amplifiers, oscillators, Schmitt trigger