

Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet u Sarajevu
Odsjek za automatiku i elektroniku

Ultrazvučni detektor

Završni rad
I ciklusa studija

Mentor:

Red.prof.dr Melita Ahić-Đokić

Kandidat:

Mina Ferizbegović

Sarajevo, juli 2014

**Red. prof. dr Melita Ahić-Đokić, dipl.el.inž.
Viši Asistent mr Emir Sokić, dipl.el.inž.
Odsjek za automatiku i elektroniku
Sarajevo, 12.01.2014.**

Tema za završni rad

studenta I ciklusa studija koji studira na ETF-u u skladu sa principima Bolonjskog procesa
na Odsjeku za automatiku i elektroniku (šk.2013/14)

Tema: Ultrazvučni detektor

Student: Ferizbegović Mina

Sažetak:

U okviru rada potrebno je dizajnirati, razviti i testirati elektronički sklop koji omogućava detekciju intenziteta ultrazvučnog signala u posmatranom okruženju. Sklop treba posjedovati zvučnu (u čujnom opsegu, do $5[\text{kHz}]$) i vizuelnu/svjetlosnu indikaciju proporcionalnu mjerenoj intenzitetu ultrazvučnog signala. Osim ovoga, sklop treba posjedovati sljedeće osobine:

- mogućnost promjene osjetljivosti (pojačanja);
- mogućnost promjene centralne frekvencije od interesa $20 \div 60[\text{kHz}] \pm 5[\text{kHz}]$.

U okviru testiranja sklopa potrebno je izvršiti detaljno snimanje karakteristika usmjerenošti senzora i amplitudno-frekventnih karakteristika.

Polazna literatura:

1. Melita Ahić-Đokić, "Signalni i sistemi", Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2010.
2. T. Brodić, "Analognna integrirana elektronika", Sarajevo: Svjetlost, 1986.
3. B. Carter i L. Huelsman, "Handbook Of Operation Amplifier Active RC Networks", Texas Instruments, 2001.
4. D. Lancaster, "Active-Filter Cookbook", Indianapolis: Howard W. Sams & Co. Inc, 1975.
5. M. McRoberts, Arduino starter kit manual, London: Earthshine Electronics, 2009.
6. M. Rafiquzzaman, "Fundamentals of Digital Logic and Microcomputer Design", Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
7. Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky: "Signals and Systems", Prentice-Hall, 1997
8. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, John R. Buck: "Discrete-time Signal Processing", Prentice Hall, 1999.
9. D. A. Neamen, "Microelectronics: Circuit Analysis and Design", New York: McGraw-Hill, 2010.

Potpis mentora:

Red. prof. dr Melita Ahić-Đokić

Sažetak

Ultrazvučni detektor je sklop koji omogućava čujnu i svjetlosnu indikaciju intenziteta ultrazvučnog signala. U okviru ovog rada realizirana su dva tipa čujne indikacije i dvije vrste svjetlosne indikacije. Čujna indikacija se može vršiti koristeći demodulator ili djelitelj frekvencije. Svjetlosna indikacija ima mogućnost detekcije frekvencije ili intenziteta ultrazvučnog signala.

Osnovni cilj izrade sklopa je da provjeri ispravnost rada ultrazvučnog senzora, odredi približnu frekvenciju i intenzitet ulaznog ultrazvučnog signala.

Abstract

Ultrasonic detector is a device which provides sound and light indication for intensity of ultrasonic signal. This paper offers two ways of sound indication and two types of light indication. Sound indication can be made by using a demodulator or a frequency divider. Light indication can indicate frequency or intensity of ultrasonic signal.

The main objective of this device is verification of ultrasonic sensor, determination of approximate frequency and intensity of ultrasonic signal.

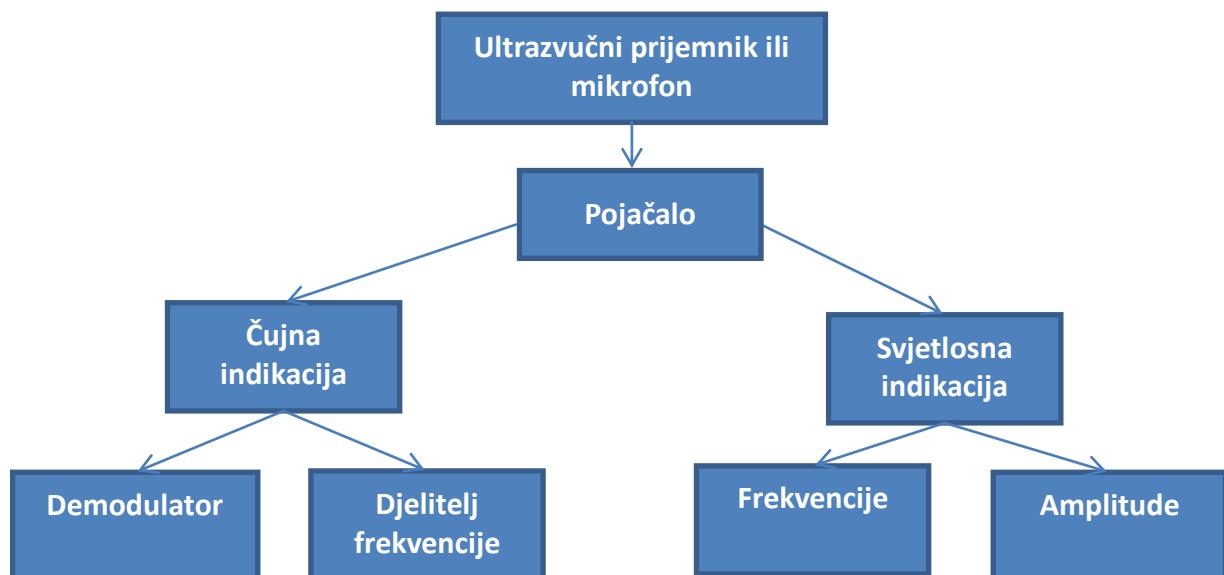
Sadržaj

1. Uvod	5
2. Modulacija	
2.1. Modulacija.....	7
2.1.1. Amplitudna modulacija	7
2.2. Demodulacija	10
2.2.1. Generator četvrtki	12
2.2.2. Mikser	15
2.2.3. NF filter	16
2.2.3.1. Aktivni NF filter.....	16
2.2.3.2. Pasivni NF filter	17
3. Promjena pojačanja signala	
3.1. Operaciona pojačala.....	19
3.1.1. Neinvertirajući spoj	20
3.1.2. Invertirajući spoj	21
3.2. Izrada pojačala	23
4. Djelitelj frekvencije	26
4.1. Kreiranje offseta	26
5. Svjetlosna indikacija	29
6. Simulacioni model ultrazvučnog detektora	31
7. Izrada ultrazvučnog detektora na matadoru	35
7.1. Izrada pojačala na matadoru	35
7.2. Izrada demodulatora na matadoru	36
8. Izrada štampane pločice	41
9. Snimanje karakteristika sklopa	
9.1. Amplitudno-frekventna karakteristika prijemnog pojačala	44
9.2. Amplitudno-frekventna karakteristika prijemno-predajnog sklopa.....	45
9.3. Karakteristika usmjerenosti senzora	46
10. Zaključak	48
11. Literatura	49
Lista korištenih skraćenica	50

1. Uvod

Ljudsko uho može registrovati frekvencije od 16 Hz do 20 kHz. Ultrazvuk je zvuk čija je frekvencija iznad gornje granice čujnosti za normalno ljudsko uho, a iznosi 20 kHz. Da bi se detektovao ultrazvuk potrebno je napraviti sklop koji će signal iz područja viših frekvencija premjestiti u područje nižih frekvencija. Taj sklop je ultrazvučni detektor.

Ultrazvučni detektor treba da omogući detekciju intenziteta ultrazvučnog signala u posmatranom okruženju. Sklop treba omogućiti čujnu i svjetlosnu indikaciju. Da bi se omogućila tražena funkcionalnost, ultrazvučni signal koji dolazi sa senzora ili mikrofona će se pojačati i izvršit će se promjena centralne frekvencije. Promjenom centralne frekvencije ljudsko uho će moći registrovati ultrazvučni signal.



Slika 1.1. Blok shema ultrazvučnog detektora

Na slici 1.1. je prikazana blok shema ultrazvučnog detektora. Ultrazvučni senzor ili mikrofon šalje signal koji ide u pojačalo. Nakon toga se izvršava njegova čujna i svjetlosna indikacija. Čujna indikacija se vrši na dva načina i to koristeći demodulator ili djelitelj frekvencije. U radu su razmotrene dvije vrste svjetlosne indikacije i to indikacija frekvencije i amplitute (intenziteta) ultrazvučnog signala.

U drugom poglavlju definišu se pojmovi modulacije i demodulacije. Nadalje se vrši klasifikacija modulacije i posebno obrađuje amplitudna modulacija. Također, u ovom poglavlju je analiziran i potreban hardver za izradu demodulatora kao jednog od načina ostvarenja čujne indikacije.

Treće poglavlje analizira rad operacionih pojačala u invertirajućem i neinvertirajućem spoju. Sadrži izradu sheme pojačala za signal koji dolazi sa ultrazvučnog senzora ili mikrofona. Analizirano je pojačalo koje se planira izraditi za pojačanje ulaznog signala.

Četvrto poglavlje razmatra djelitelj frekvencije kao jedan od načina ostvarenja čujne indikacije.

Peto poglavlje analizira izradu svjetlosne indikacije pomoću kola LM3914. Izvršen je proračun potrebnih komponenti za realizaciju svjetlosne indikacije.

U šestom poglavlju se vrši simulacija elemenata sklopa, a izrada eksperimenta na matadoru je obrađena u sedmom poglavlju.

Osmo poglavlje obrađuje izradu štampane pločice ultrazvučnog detektora.

Snimljene karakteristike sklopa se nalaze u devetom poglavlju. Snimljena je karakteristika usmjerenosti senzora i amplitudno-frekventne karakteristike prijemnog pojačala i prijemno-predajnog sklopa.

2. Modulacija

2.1. Modulacija

Najjednostavniji prenos signala je u osnovnom, prirodnom ili fizičkom opsegu učestanosti. Međutim, savremene tehnike prenosa signala zahtijevaju prethodnu obradu originalnih signala. Suština ovih metoda je slijedeća: jednom pomoćnom periodičkom signalu (determinističkom) modificiraju se neki od njegovih osnovnih parametara u funkciji karakterističnih veličina nekog drugog, bilo kakvog signala. Ovaj postupak naziva se *modulacija*.

Signal, originalni nosioc poruke, naziva se *modulišući* signal. Pomoćni periodički signal je *nosilac*, a nosilac modificiran modulišućim signalom je *modulirani* signal.

Postoji više postupaka za moduliranje nosioca, a oni se mogu podijeliti prema talasnom obliku moduliranog signala u dvije osnovne grupe. U prvu grupu spadaju postupci u kojima je *modulirani signal kontinualan*, a u drugu oni kod kojih je modulirani *signal impulsnog talasnog oblika*.

U prvoj grupi kao nosilac uvijek se koristi signal čiji je talasni oblik sinusni, pa je rezultat modulacije kontinualni signal. Sinusni signal ima tri karakteristična parametra: amplitudu, učestanost i fazu. Na svaki od ovih parametara može se uticati tako da se izabrani parametar mijenja direktno proporcionalno modulišućem signalu. Tako, u zavisnosti od zakona koga diktira modulišući signal, mijenja se amplituda, učestanost ili faza nosioca. Rezultat kontinualne modulacije može biti:

- amplitudno modulirani signal - AM
- frekventno-modulirani signal - FM
- fazno modulirani signal - PM

Kao postupak demodulacije kod kojih je modulirani signal impulsnog talasnog oblika, kao nosilac se koristi povorka impulsa. S obzirom na talasni oblik moduliranog signala, koji je diskretan, sve vrste modulacije koje spadaju u ovu grupu zasnivaju se na principu formuliranom teoremom o uzimannju uzoraka. Tako impulsna modulacija može biti:

- amplitudno impulsna modulacija - AIM
- impulsna modulacija po trajanju impulsa ili širinsko impulsna modulacija – ITM
- impulsno položajna modulacija – IPM
- impulsno kodna modulacija- IKM

2.1.1. Amplitudna modulacija

Amplitudna modulacija spada u grupu linearnih sistema. Modulacija se kod linearnih sistema obavlja translacijom spektra modulišućeg signala za vrijednost ω_0 . To znači da će željena poruka prenositi moduliranim signalom u jednom drugom, višem opsegu učestanosti, čiji je položaj diktiran izborom vrijednosti ω_0 .

Amplitudna modulacija može se predstaviti kao množenje funkcije $f(t)$ funkcijom oblika $e^{j\omega_0 t}$. Taj umnožak ima Fourierovu transformaciju:

$$F\{f(t)e^{j\omega_0 t}\} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j(\omega-\omega_0)t} dt = F(j\omega - j\omega_0) \quad (2.1.)$$

Iz relacije (2.1) se vidi da je spektar $F(j\omega)$ pomjeren duž ω ose za ω_0 .

Na slici 2.1. prikazana je blok shema realna modulacije gdje nosilac $e^{j\omega_0 t}$ je zamijenjen realnom funkcijom sinusnog talasnog oblika koja je data izrazom:

$$f_0(t) = f_{0\max} \cos \omega_0 t \quad (2.2.)$$

gdje je $f_{0\max}$ maksimalna amplituda nosioca, a ω_0 njegova kružna učestanost.

Signal koji predstavlja poruku opisan je funkcijom $f_m(t)$ i ima slijedeće osobine:

- srednja vrijednost signala $f_m(t)$ je nula;
- signal $f_m(t)$ ima spektar ograničen učestanošću ω_M , te se naziva sprektralno ograničen signal, i za njeg vrijedi:

$$f_m(t) \xleftarrow{\text{F.T.}} F_m(j\omega), \quad F_m(j\omega) \quad \text{za} \quad |\omega| > \omega_M \quad (2.3.)$$

Amplitudna modulacija zasniva se na principu modifikacije amplitude nosioca, tako da ona u procesu modulacije postaje direktno srazmjerna modulišućem signalu. Prema tome, izraz za amplitudno modulirani signal (AM) je:

$$f_m(t) \xleftarrow{\text{F.T.}} F_m(j\omega), \quad F_m(j\omega) \quad \text{za} \quad |\omega| > \omega_M \quad (2.4.)$$

gdje su A i k proizvoljne konstante, a $f_m(t)$ modulišući signal. Za $A=0$ modulirani signal je:

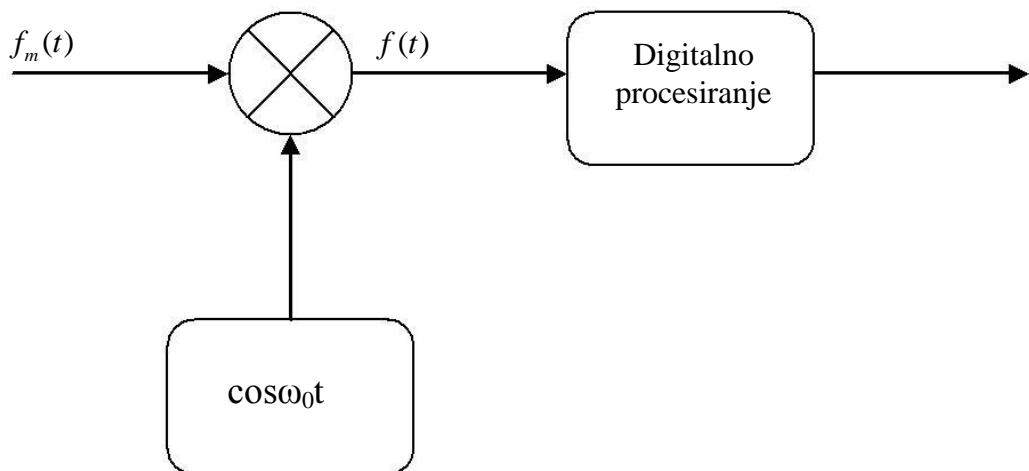
$$f(t) = kf_m(t) \cos \omega_0 t \quad (2.5.)$$

Funkcija $kf_m(t) \cos \omega_0 t$ dodiruje funkciju $kf_m(t)$ kada funkcija $\cos \omega_0 t$ ima maksimalnu vrijednost, a funkciju $-kf_m(t)$ kada $\cos \omega_0 t$ ima minimalnu vrijednost. To znači da su funkcije $kf_m(t)$ i $-kf_m(t)$ obvojnice signala $kf_m(t) \cos \omega_0 t$. Na taj način poruka, koja predstavlja modulišući signal $f_m(t)$, postaje utisnuta u signal nosioc $f_0(t)$ u vidu njegove promjenljive amplitude. Spektri nosioca, modulišućeg i moduliranog signala u Fourierove transformacije signala $f_0(t)$, $f_m(t)$ i $f(t)$:

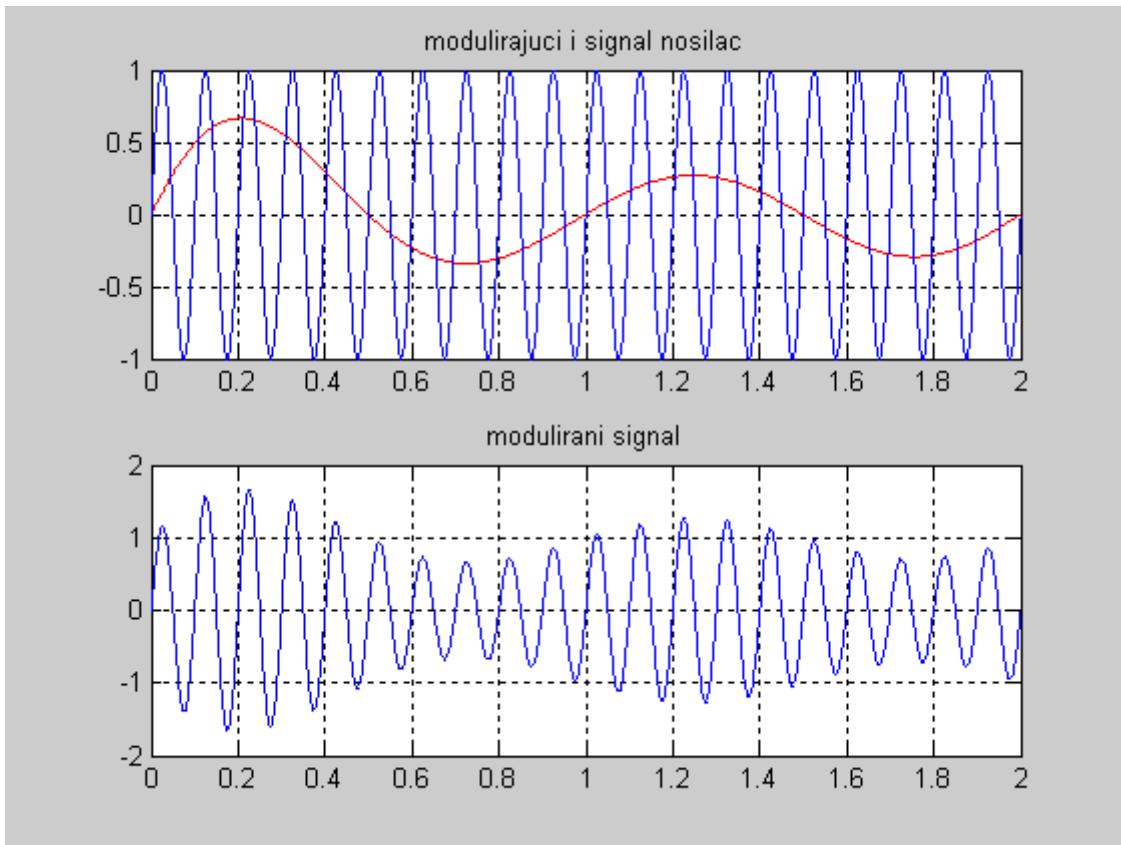
$$F\{f_m(t)\} = F_m(j\omega) \quad i \quad F\{f(t)\} = F(j\omega)$$

$$\begin{aligned}
 F(j\omega) &= F\{kf_m(t)\cos\omega_0 t\} = F\left\{kf_m(t)\frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2}\right\} = \\
 &= \frac{k}{2}(F_m(j\omega - j\omega_0) + F_m(j\omega + j\omega_0))
 \end{aligned} \tag{2.6.}$$

Na osnovu relacije (2.6.) zaključuje se da je množenje signala $kf_m(t)$ signalom $\cos\omega_0 t$ u vremenskom domenu rezultiralo dvjema translacijama spektra $F(j\omega)$ u frekventnom domenu ($\pm\omega_0$). Pri tome je spektralna gustina amplituda $F_m(j\omega)$ pomnožena faktorom $k/2$. Dobijeni spektar $F_m(j\omega)$ je također ograničen [2].



Slika 2.1. Blok shema modulatora



Slika 2.2. Amplitudna modulacija

Na slici 2.2. su prikazani modulirajući, signal nosilac i modulirani signal. Modulirani signal predstavlja umnožak modulirajućeg i signala nosioca.

2.2. Demodulacija

Demodulacija je postupak dobivanja orginalnog (modulišućeg) signala iz moduliranog, a dobijeni orginalni signal naziva se demodulirani signal. U procesu demodulacije spektar modulišućeg signala se vraća na početnu nisku frekvenciju.

Uređaj koji vrši demodulaciju naziva se **demodulator**. Demodulator sadrži množać signala (slika 2.3.), čiji su ulazi modulirani signal $f(t)$ i signal $\cos \omega_0 t$. Izlaz iz množaća je:

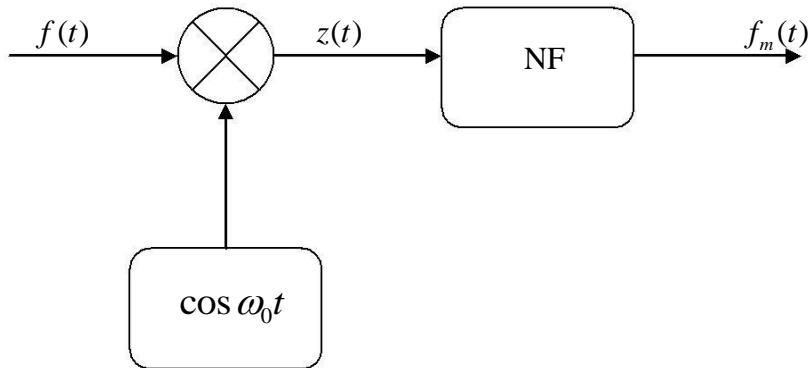
$$z(t) = f(t) \cos \omega_0 t \quad (2.7.)$$

a njegova Fourierova transformacija je:

$$\begin{aligned} Z(j\omega) &= \frac{1}{2} (F(j\omega - j\omega_0) + F(j\omega + j\omega_0)) = \\ &= \frac{K}{4} F_m(j\omega - j2\omega_0) + \frac{K}{2} F_m(j\omega) + \frac{K}{4} F_m(j\omega + j2\omega_0) \end{aligned} \quad (2.8.)$$

Da bi se dobio orginalni signal $f_m(t)$ iz signala $z(t)$, signal $z(t)$ treba propustiti kroz niskopropusni filter (NF), za koga je $H(j\omega)=0$ za $|\omega|>\omega_c$, gdje je ω_c granična frekvencija filtra. Ako je amplitudni spektar takav da je za $|\omega|<\omega_c$ onda neće biti gubitaka pri prenosu signala.

Za izradu demodulatora potrebno je realizirati elektroničku strukturu množača, NF filtera i signal $\cos\omega_0t$ (slika 2.3.) [2].



Slika 2.3. Blok shema dobijanja orginalnog signala $z(t)$

Signal $\cos\omega_0t$ se ne realizira u radu. Koristi se signal četvrtki jer u osnovi rada nije bitno izobličenje signala nego samo potvrda o radu senzora i određivanje približne frekvencije orginalnog signala.

Razvojem u Fourierov reda signala unipolarne četvrtke dobija se [2]:

$$f(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cos((2k+1)\omega_0 t)}{2k+1} \quad (2.9.)$$

Iz relacije (2.9.) se vidi da viši harmonici imaju manju amplitudu i da se u razvoju pojavljuju samo neparni harmonici. Pošto se na izlazu demodulatora nalazi filter, on će ugušiti neke više harmonike. Viši harmonici koji budu u propusnom opsegu će imati amplitudu manju od osnovnog harmonika. Dolazi do izobličenja signala, ali je moguće dobiti potvrdu o radu senzora i približnoj osnovnoj frekvenciji ulaznog signala.

2.2.1. Generator četvrtki

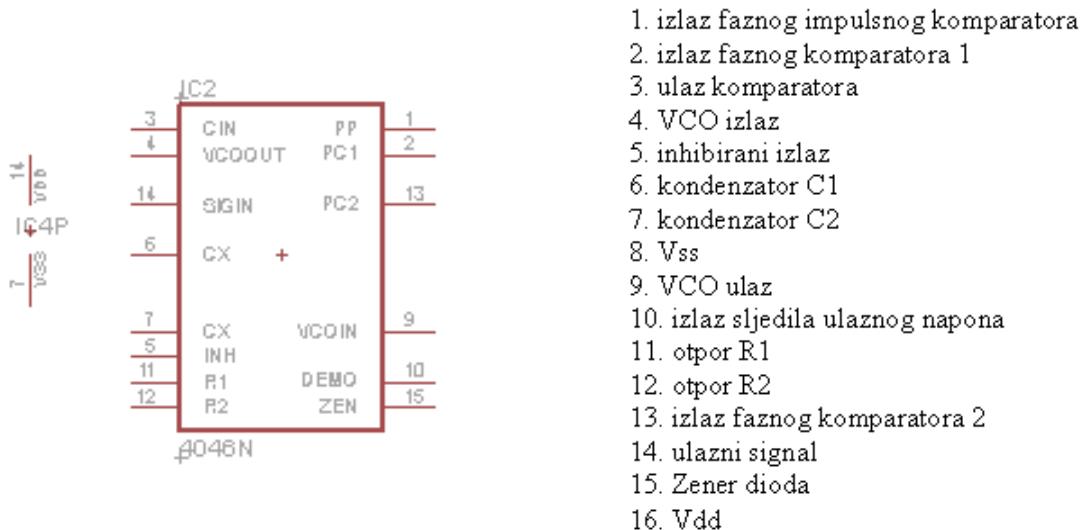
U radu se kao generator četvrtki koristi kolo 4046.

Razmatrano kolo je pogodno za korištenje zbog linearnega odnosa napona ulaznog signala i frekvencije. Ima malu potrošnju. Pogodnim odabirom otpornika i uz korištenje jednog potenciometra je moguće ostvariti promjenu centralne frekvencije 20 kHz-60 kHz [3].

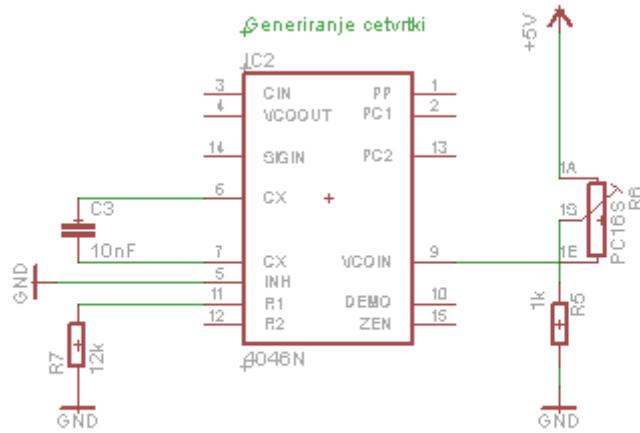
Naponski kontroliran oscilator (VCO) je elektronski oscilator čija frekvencija osciliranja ovisi o naponskom ulazu. Nalazi se u unutrašnjoj strukturi kola 4046 i određuje frekvenciju izlaznog signala.

Na slici 2.4. je prikazan raspored pinova za kolo 4046. Za izradu generatora četvrtki promjenljive frekvencije koristi se samo pinovi koji utiču na interni oscilator VCO. Na slici 2.5. je prikazana uobičajena shema spajanja. R₂ nije spojeno jer se prepostavlja da $R_2 \rightarrow \infty$ i tada frekvencija oscilatora nema offset [4].

Za izradu demodulatora kolo 4046 treba da generira frekvenciju od 20 do 60 kHz. Da bi se to postiglo potrebno je proračunati otpornike i kondenzator u kolu.



Slika 2.4. Raspored pinova na kolu 4046



Slika 2.5. Shema spajanja 4046 kola

$R_1(k\Omega)$	I_{cr}
3.0	13.5
5.1	17.5
9.1	21.5
12	23.0
15	24.0
30	26.5
40	27.0
51	28.5
110	29.0
300	31.0

Tabela 2.1. Odnos I_{cr} i R_1 (Tabela preuzeta iz [4])

Proračun:

Najmanja vrijednost frekvencije na izlazu kola se računa kao:

$$f_{\min} = \frac{3VCO_{in\min} \frac{I_{cr}}{R_1} + \frac{9.2}{R_2}}{2C_1(V_{dd} + 2.1)}, \quad (2.10.)$$

pri čemu je I_{cr} parametar koji ovisi o otporu R_1 prema Tabeli 2.1., V_{dd} napon napajanja kola i $VCO_{in\min}$ najmanja vrijednost ulaznog signala na pin 9 [4].

Najveća vrijednost frekvencije na izlazu kola se računa kao:

$$f_{\min} = \frac{3VCO_{in\max} \frac{I_{cr}}{R_1} + 9.2}{2C_1(V_{dd} + 2.1)}, \quad (2.11.)$$

pri čemu je $VCO_{in\max}$ najveća vrijednost ulaznog signala na pin 9 [4].

Ako se pretpostavi da otpor $R_2 \rightarrow \infty$ onda vrijednost frekvencije linearno ovisi o VCO_{in} :

$$f = \frac{3VCO_{in} \frac{I_{cr}}{R_1}}{2C_1(V_{dd} + 2.1)}, \quad (2.12.)$$

Pomoću relacija (2.10.), (2.11.) i (2.12.) je moguće odabrati komponente tako da se na izlazu dobije frekvencija 20-60 kHz.

Ako se usvoji vrijednost kondenzatora $C_1 = 10nF$ i otpornika $R_1 = 12k\Omega$ dobija se na osnovu relacije (2.11.):

$$VCO_{in} = 0.0247f, \quad (2.13.)$$

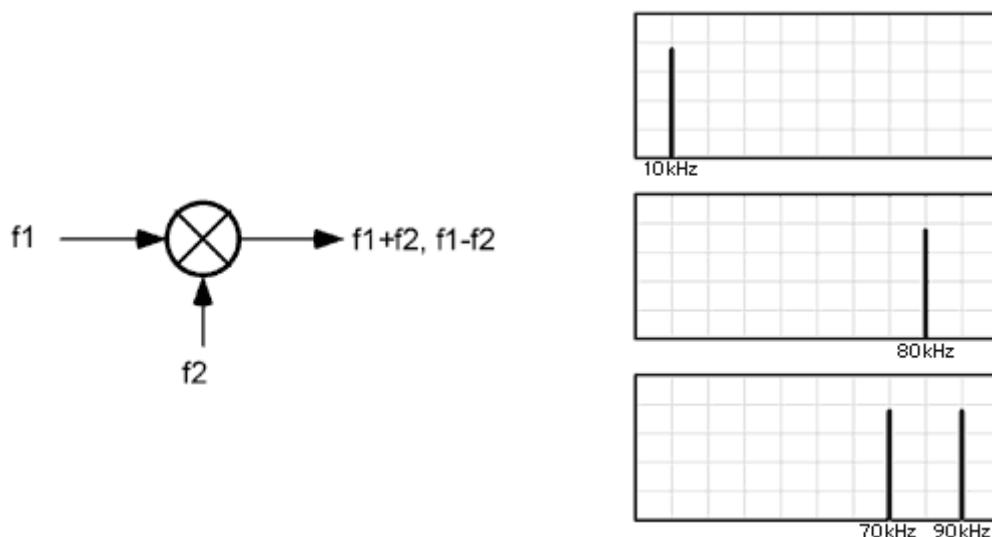
pri čemu je f izražen u kHz.

Na osnovu toga po relaciji (2.12) se dobija da je $VCO_{in\max} = 1.43V$ i $VCO_{in\min} = 0.494V$. Ove vrijednosti je moguće dobiti ako se za vrijednost otpora odabere $R_4 = 1k\Omega$ i R_3 kao potenciometar čiji otpor ima maksimalnu vrijednost $10k\Omega$.

Dakle, svaka promjena napona od $0.25V$ mijenja frekvenciju za 10 kHz.

2.2.2. Mikser

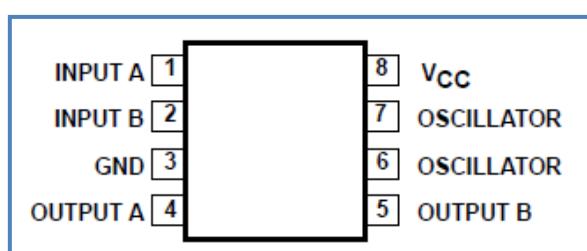
Mikser je uređaj koji obavlja funkciju transpozicije frekvencije. Sastoje se od nelinearnog elementa na kojem se miješaju radiofrekvencijski signal i signal lokalnog oscilatora (LO) da bi se između većeg broja novostvorenih frekvencijskih komponenata filtriranjem izdvojila ona željena. U ovom slučaju se vrši miješanje signala sa ultrazvučnog senzora i signala sa 4046 kola. Frekvencija izlaznog signala naziva se i međufrekvencija, a predstavlja razliku između frekvencije LO signala i frekvencije RF. Iza mixera se postavlja NF filter koji zapravo određuje tu međufrekvenciju.



Slika 2.6. Blok shema rada miksera i prikaz u frekventnom domenu

Za izradu miksera će se koristiti NE612 (SA612) kolo. Omogućava množenje dva signala i koristi se za frekvencije do 500 MHz [5]. Ovo kolo ima malu cijenu i potrošnju.

Na slici 2.7. je prikazan raspored pinova NE612 kola.

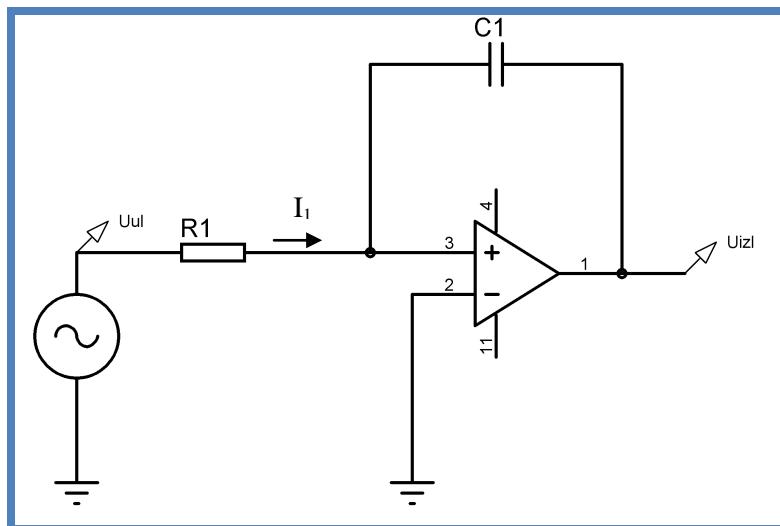


Slika 2.7. Raspored pinova NE612 kola (Slika preuzeta iz [5])

2.2.3. NF filter

2.2.3.1. Aktivni NF filter prvog reda

Na slici 2.8. je prikazan aktivni RC filter prvog reda sa ulazom sinusnog talasnog oblika.



Slika 2.8. Aktivni NF filter prvog reda

Proračun aktivnog NF filtera prvog reda:

Budući da je ulazna impedanca operacionog pojačala jako velika nema struje u „+“ stezaljku, te struja I_1 koja teče kroz otpornik R_1 teče i kroz kondenzator C_1 pa vrijedi:

$$I_1 = \frac{U_{ul}}{R_1 + X_{c1}} \quad (2.14.)$$

gdje je R_1 otpornost u kolu, U_{ul} ulazni signal u kolo, a X_{c1} reaktansa kondenzatora.

Reaktansa kondenzatora se može se izraziti kao:

$$X_{c1} = \frac{1}{sC_1} \quad (2.15.)$$

Ako se relacija (2.15.) uvrsti u relaciju (2.14) dobija se da je vrijednost I_1 struje:

$$I_1 = \frac{U_{ul}}{R_1 + \frac{1}{sC_1}} \quad (2.16.)$$

Napon na „+“ stezaljki jednak je naponu na „-“stezaljki, pa je izlazni napon jednak:

$$U_{izl} = -X_{c1} \cdot I_1 \quad (2.17.)$$

Ako se relacija (2.16.) uvrsti u relaciju (2.17) dobija se da je vrijednost izlaznog napona:

$$U_{izl} = -\frac{U_{ul}}{1 + sR_1C_1} \quad (2.18.)$$

Odnos izlaznog i ulaznog signala $H(s)$ je:

$$H(s) = -\frac{1}{1 + sR_1C_1} \quad (2.19.)$$

Ako u relaciju (2.19.) uvede smjena $s = j\omega$ dobija se:

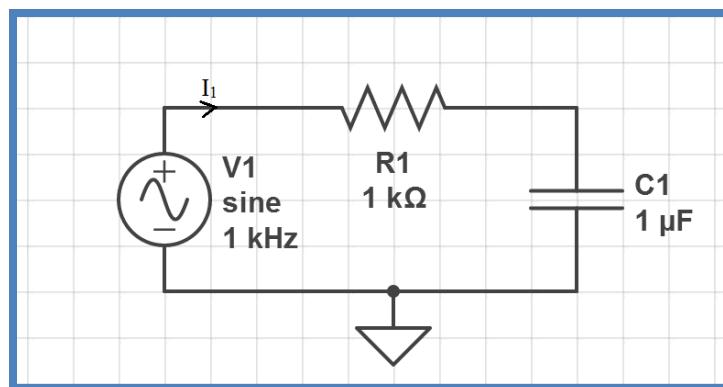
$$H(j\omega) = -\frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad (2.20.)$$

Granična frekvencija je:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.21.)$$

2.2.3.2. Pasivni NF filter prvog reda

Na slici 2.9. je prikazan RC filter prvog reda sa ulazom sinusnog talasnog oblika.



Slika 2.9. Pasivni NF filter prvog reda

Proračun NF filtera prvog reda

Struja I_1 ima vrijednost:

$$I_1 = \frac{U_{ul}}{R_1 + X_{c_1}} \quad (2.22.)$$

gdje je R otpornost u kolu, U_{ul} ulazni signal u kolo, a X_c reaktansa kondenzatora. Reaktansa kondenzatora se može se izraziti kao:

$$X_{c_1} = \frac{1}{sC_1} \quad (2.23.)$$

Ako se izraz (2.23.) uvrsti u izraz (2.22) dobija se da je vrijednost I_1 struje:

$$I_1 = \frac{U_{ul}}{R_l + \frac{1}{sC_1}} \quad (2.24.)$$

Napon na kondenzatoru je izlazni napon koji je jedak:

$$U_{izl} = X_{c_1} \cdot I_1 \quad (2.25.)$$

Ako se izrazi (2.24.) i (2.23) uvrste u izraz (2.25) dobija se da je vrijednost izlaznog napona:

$$U_{izl} = \frac{U_{ul}}{1 + sR_l C_1} \quad (2.26.)$$

Odnos izlaznog i ulaznog signala $H(s)$ je:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sR_l C_1} \quad (2.27.)$$

Ako u izraz (2.27.) uvedemo smjenu $s = j\omega$ dobija se da je:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R_l C_1} \quad (2.28.)$$

Granična frekvencija je:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_l C_1} \quad (2.29.)$$

Za potrebe rada se koristi pasivni NF filter, a usvojene su komponente $R_l = 8.2k\Omega$ i $C_1 = 1.52nF$. Odabirom ovih komponenti granična frekvencija je $f_c = 12.8kHz$.

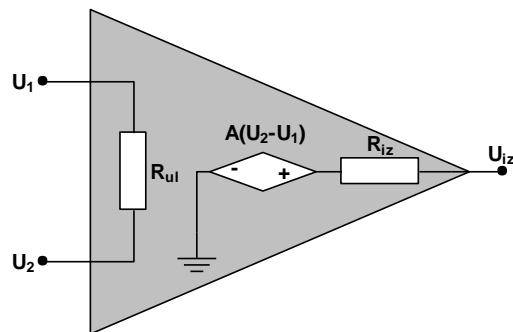
3. Promjena pojačanja signala

Ultrazvučni senzor ili mikrofon predstavlja moguće ulaze za ultrazvučnog detektor. (slika 1.1.). Signal koji mikrofon predaje je reda 0.5 mV. Da bi se vršila dalja obrada signala, prvo je potrebno pojačati signal. U radu se projektuje pojačalo sa promjenljivim pojačanjem koje će signal pojačavati do 1000 puta. Za izradu pojačala koriste se operaciona pojačala.

3.1. Operaciono pojačalo

Operaciono pojačalo je elektronički sklop koji ima širokopojasno, istosmjerno pojačalo visokog pojačanja, visoke ulazne i niske izlazne impedanse. Sastoji se od dva ulaza, jednog izlaza i dva priključka za napajanje. Ulaz označen sa „-“ naziva se invertirajući, a ulaz sa oznakom „+“ je neinvertirajući.

Koristi se kao pojačalo istosmjernog ili naizmjeničnog napona, diferencijalno pojačalo, naponsko sljedilo i u mnoge druge svrhe.



Slika 3.1. Model operacionog pojačala

Na slici 3.1. je prikazan model operacionog pojačala. Oznake na modelu predstavljaju slijedeće parametre operacionog pojačala:

R_{ul} - ulazna otpornost,

R_{iz} - izlazna otpornost,

A - pojačanje.

Pošto je R_{iz} zanemarive vrijednosti, može se pretpostaviti izlazni napon:

$$U_{iz} = A(U_2 - U_1) \quad (3.1.)$$

Na osnovu relacije (3.1.) slijedi da je:

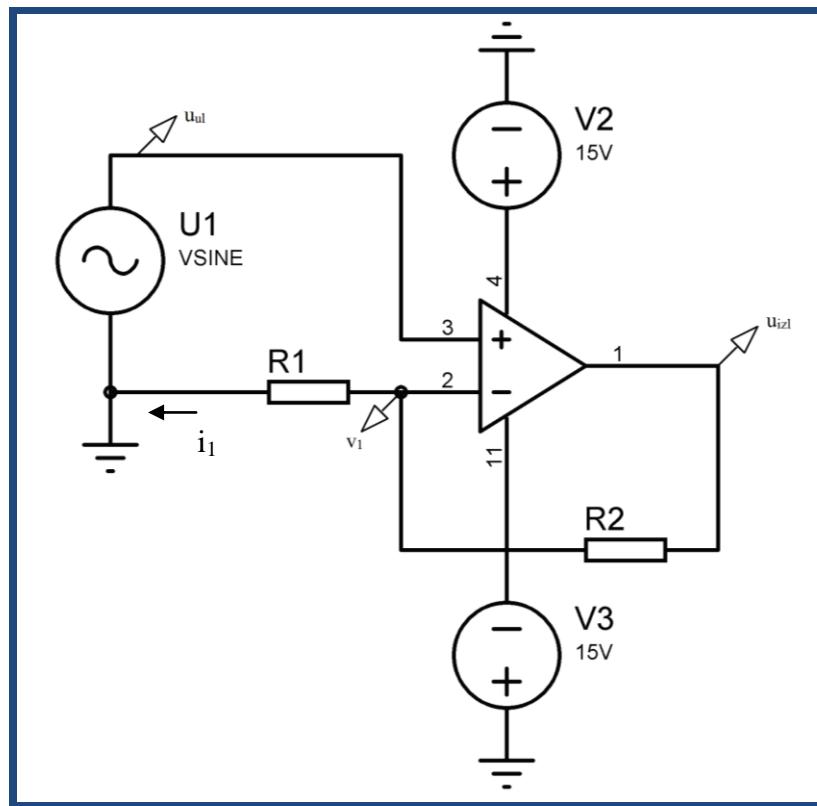
$$(U_2 - U_1) = \frac{U_{iz}}{A} \quad (3.2.)$$

Pošto je pojačanje A operacionog pojačala reda 10^5 , onda izraz na lijevoj strani relacije postaje 0, a na osnovu toga slijedi:

$$U_2 = U_1 \quad (3.3.)$$

Ako se OP pojačalo koristi za pojačavanje, obično se primjenjuje uz negativnu povratnu vezu, koja se ostvaruje vraćanjem dijela izlaznog napona na invertirajući ulaz. Pritom su moguće dvije vrste spoja: **neinvertirajući** i **invertirajući** spoj.

3.1.1. Neinvertirajući spoj



Slika 3.2. Neinvertirajući spoj

Na osnovu slike 3.2. vrši se proračun operacionog pojačala u neinvertirajućem spoju.

Proračun sklopa:

Budući da je ulazna impedansa operacionog pojačala jako velika nema struje u „-“ stezaljku, te struja i_1 koja teče kroz otpornik R_1 teče i kroz otpornik R_2 pa vrijedi:

$$i_1 = \frac{u_{izl}}{R_1 + R_2} \quad (3.4.)$$

Napon v_1 je prema prvom Kirhofovom zakonu je:

$$v_1 = R_1 i_1 \quad (3.5.)$$

Zbog relacije (3.3.) slijedi da je:

$$v_1 = u_{ul} \quad (3.6.)$$

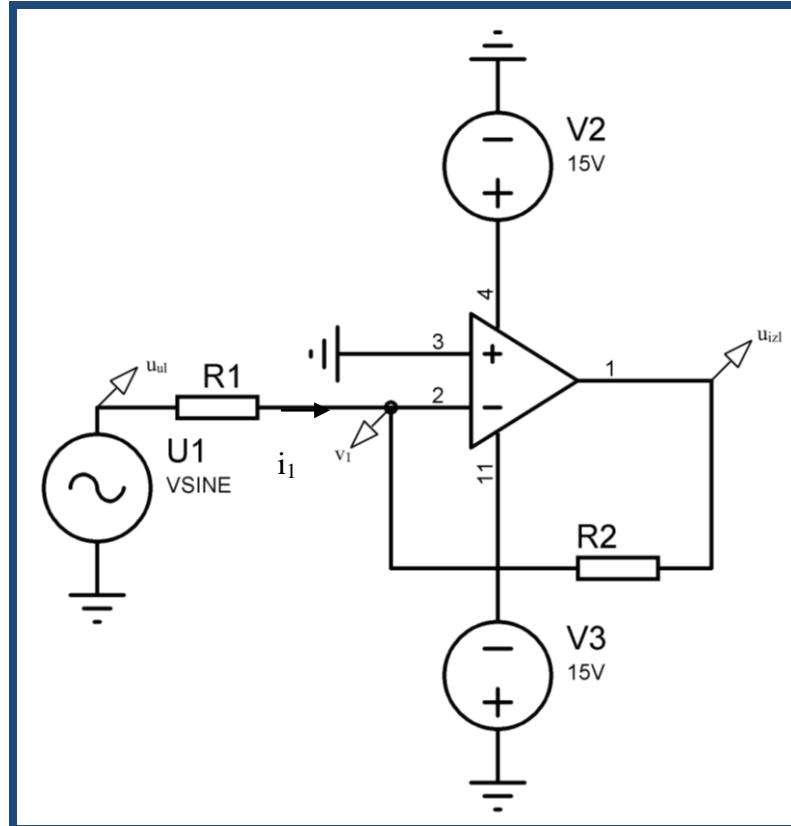
Na osnovu relacija (3.5.) i (3.6.) slijedi da je struja i_1 :

$$i_1 = \frac{u_{ul}}{R_1} \quad (3.7.)$$

Koristeći relacije (3.4.) i (3.7.) dobija se u_{izl} :

$$u_{izl} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{ul} \quad (3.8.)$$

3.1.2. Invertirajući spoj



Slika 3.3. Invertirajući spoj

Na osnovu slike 3.3. vrši se proračun operacionog pojačala u invertirajućem spoju.

Proračun:

Budući da je ulazna impedansa operacionog pojačala jako velika, struja i_1 koja teče kroz otpornik R_1 teče i kroz otpornik R_2 pa vrijedi:

$$i_1 = \frac{u_{ul} - u_{izl}}{R_1 + R_2} \quad (3.9.)$$

Napon v_1 je prema prvom Kirhofovom zakonu je:

$$v_1 = u_{izl} + R_2 i_1 \quad (3.10.)$$

Zbog relacije (3.3) slijedi da je:

$$v_1 = 0 \quad (3.11.)$$

Na osnovu relacija (3.10.) i (3.11.) slijedi da je struja i_1 :

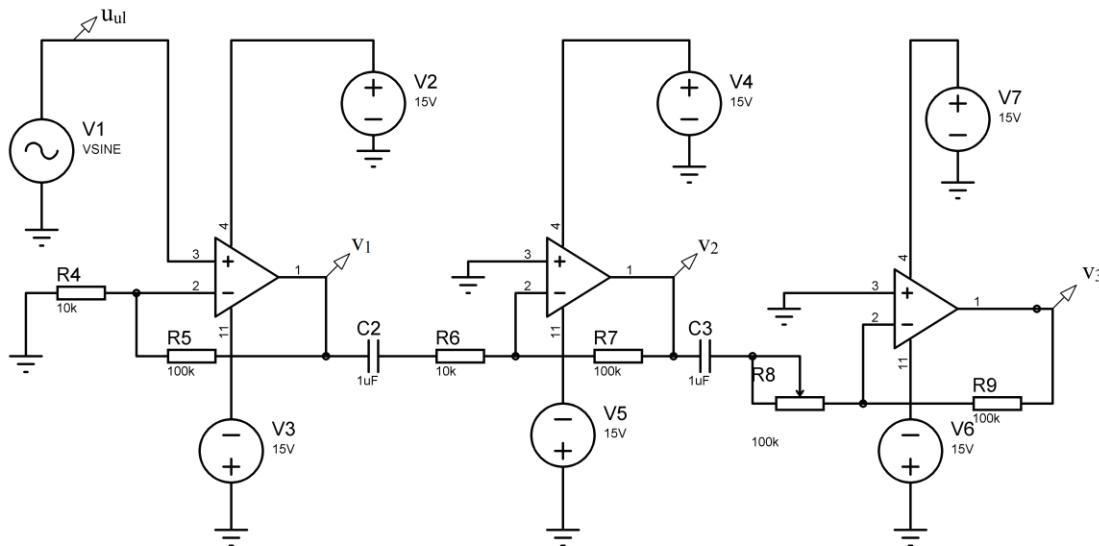
$$i_1 = -\frac{u_{izl}}{R_2} \quad (3.12.)$$

Koristeći relacije (3.9.) i (3.12.) dobija se u_{izl} :

$$u_{izl} = -\frac{R_2}{R_1} u_{ul} \quad (3.13.)$$

3.2. Pojačanje ulaznog signala

Za izradu pojačala sa ultrazvučnog senzora se koriste tri operaciona pojačala i to prvi stepen u neinvertirajućem spoju, a drugi i treći stepen su pojačala u invertirajućem spoju.



Slika 3.4. Model pojačala

Na slici 3.4. je prikazan model pojačala na osnovu kojeg se vrši proračun.

Proračun:

Prvi stepen pojačala je OP u neinvertirajućem spoju, a po relacije (3.8.) v_1 je:

$$v_1 = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) u_{in} \quad (3.14.)$$

Drugi stepen pojačala je OP u invertirajućem spoju, a po relacije (3.13.) v_2 je:

$$v_2 = -\frac{R_7}{R_6} v_1 \quad (3.15.)$$

Treći stepen pojačala je OP u invertirajućem spoju, a po relacije (3.13.) v_3 je:

$$v_3 = -\frac{R_9}{R_8} v_2 \quad (3.16.)$$

Dakle, ukupno pojačanje je:

$$\frac{v_3}{u_{ul}} = \frac{R_9}{R_8} \frac{R_7}{R_6} \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \quad (3.17.)$$

Ako se neki od otpornika realizira kao potenciometar dobija se promjenljivo pojačanje. Na taj način se realizira otpornik R_8 .

Pogodnim odabirom otpornika moguće je ostvariti traženo pojačanje.

Realno OP ima ograničen frekventno-propusni opseg, a ultrazvučni signal se nalazi na visokoj frekvenciji. Zbog toga treba voditi računa da vrijednost pojačanja ne bude prevelika da ne bi došlo do izobličenja amplitude signala. Pošto je potrebno ostvariti pojačanje od 1000, može se usvojiti da svaki od tri stepena pojačala vrši pojačanje 10 puta. Ako se odaberu sljedeće vrijednosti otpornika:

$$\begin{aligned} R_5 &= R_7 = R_9 = 100 \text{ k}\Omega \\ R_4 &= R_6 = 10 \text{ k}\Omega \\ 10 < R_8 < 50 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

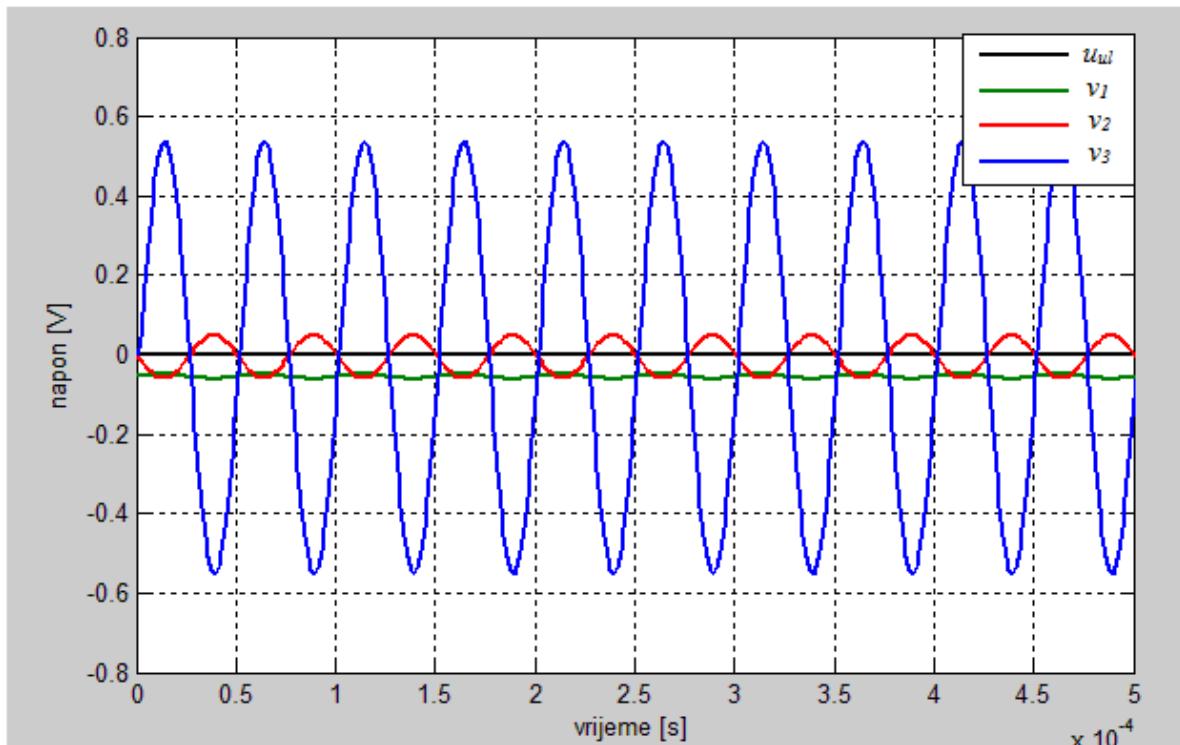
i uvrste u relaciju (3.17.) dobija se pojačanje:

$$220 < \frac{v_3}{u_{ul}} < 1000, \quad (3.18.)$$

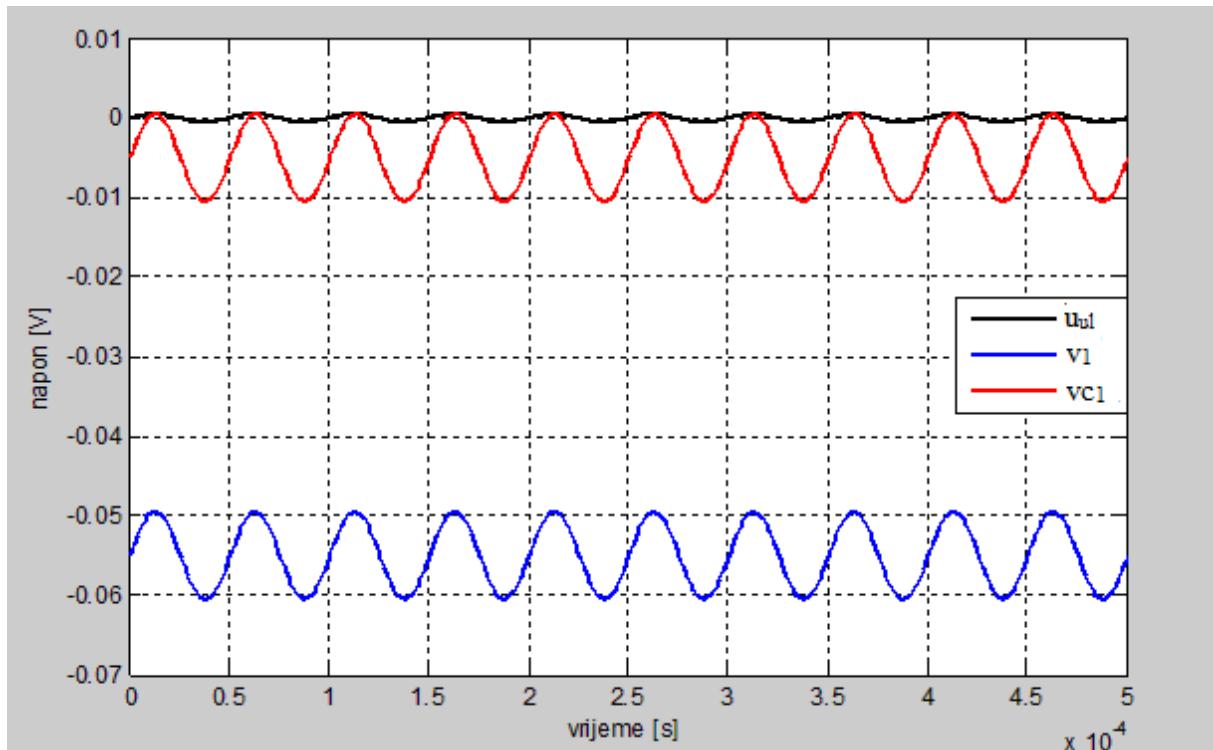
koje zadovoljava postavljeni uslov pojačanja.

Odabrane vrijednosti otpornika na ovaj način omogućuju ostvariti pojačanje reda 1000 što pokazuje slika 3.5. Simulacija je rađena u simulacionom programu *Proteus 7*. Ulagani signal je na frekvenciji od 20 kHz.

Na slici 3.6. je prikazan ulazni signal u_{ul} , napon nakon prvog stepena pojačanja v_1 i napon nakon kondenzatora C_1 . Uočava se da kondenzator znatno smanjuje istosmjeru komponentu. Dakle, osnovna uloga kondenzatora u kolu je potiskivanje istosmjerne komponente signala.



Slika 3.5. Ulazni signal, signal v_1 , v_2 i v_3



Slika 3.6. Ulazni signal, signal v_1 i signal nakon kondenzatora C_1

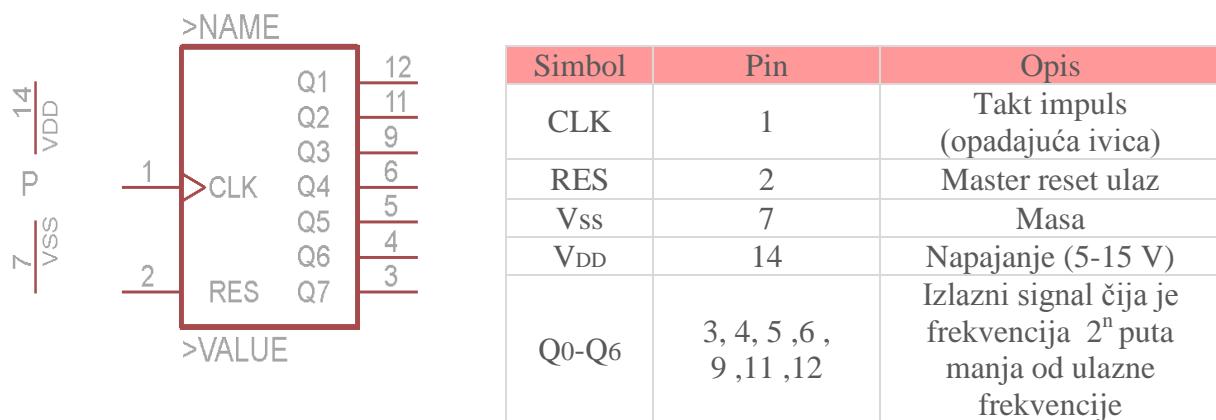
4. Djelitelj frekvencije

U radu za drugi način izvršenja čujne indikacije je korišten djelitelj frekvencije.

Kao djelitelj frekvencije koristi se kolo CD4024. Ovo kolo je sedmobitni binarni brojač koji može vršiti dijeljenje ulazne frekvencije do 128 puta [6].

Za izradu zvučne indikacije u ovom radu se koristi dijeljenje sa 16 jer će omogućiti da frekvencije ultrazvučnog signala do 240 kHz premjesti u polja nižih frekvencija.

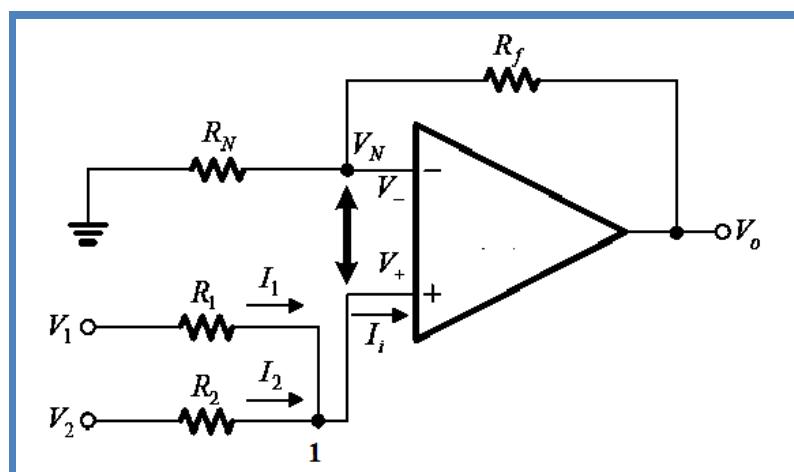
Za napajanje sklopa je korišten napon od 5V. Dakle, kolo na izlazu može dati signal napona od 0 do 5 V. Pošto pojačani ultrazvučni signal je bipolaran, potrebno je napraviti *offset*.



Slika 4.1. Raspored pinova na kolu CD4024

4.1. Kreiranje offseta

Za kreiranje offseta koristi se operaciono pojačalo TL084 u spoju neinvertirajućeg sumatora. Shema spoja je data na slici 4.2.



Slika 4.2. Operaciono pojačalo u spoju neinvertirajućeg sumatora

Proračun:

Struja I_i možemo zanemariti zbog velike ulazne otpornosti operacionog pojačala. Dakle, zakon grananja struja u čvoru 1 glasi:

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (4.1.)$$

Napon čvora 1 izražen preko struje I_1 :

$$V_+ = V_1 - R_1 I_1 \quad (4.2.)$$

Napon čvora 1 izražen preko struje I_2 :

$$V_+ = V_2 - R_2 I_2 \quad (4.3.)$$

Na osnovu relacija (4.2.) i (4.3.) struja I_1 iznosi:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_1 + R_2} \quad (4.4.)$$

koristeći relacije (4.2.) i (4.4.) dobija se napon V_+ :

$$V_+ = V_1 - R_1 \frac{V_1 - V_2}{R_1 + R_2} \quad (4.5.)$$

Ako se usvoji jednakost otpornika R_1 i R_2 napon V_+ postaje:

$$V_+ = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.6.)$$

Pošto je pojačanje operacionog pojačala reda 10^5 vrijedi da je $V_+ = V_-$, pa na osnovu relacije (4.6.) slijedi da je:

$$V_- = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.7.)$$

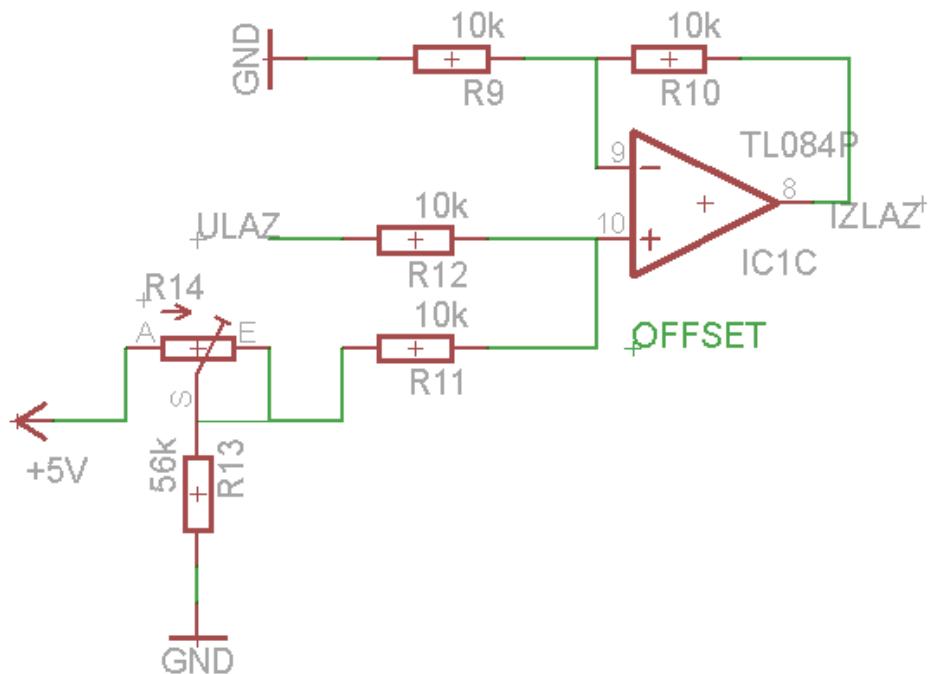
Koristeći relaciju za neinvertirajući spoj operacionog pojačala (3.8.) izlazni napon V_0 je:

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} \left(1 + \frac{R_f}{R_N}\right) \quad (4.8.)$$

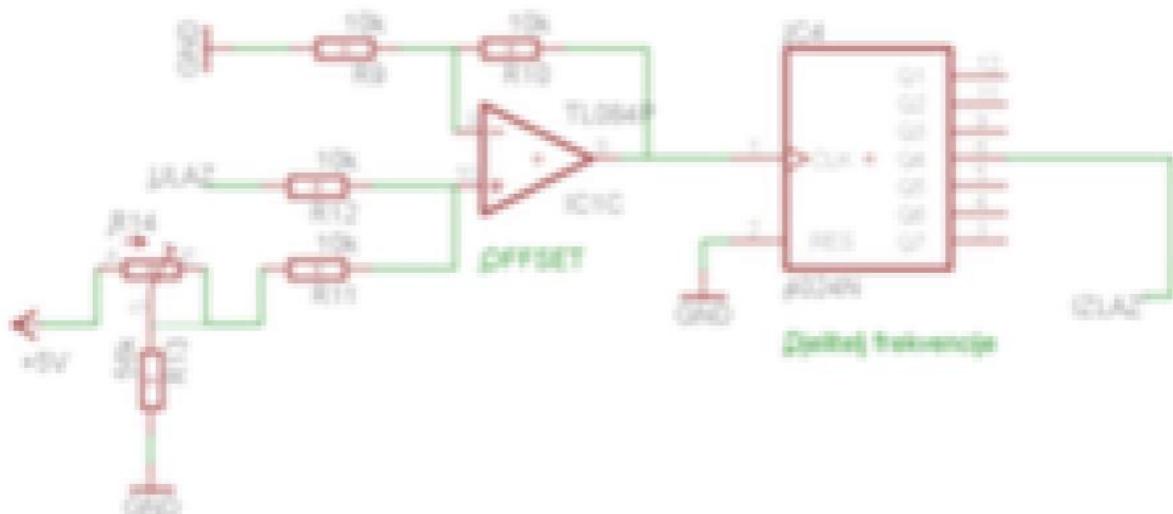
Ako se usvoji jednakost otpornika R_f i R_N napon V_0 postaje:

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (4.6.)$$

U radu će se ostvariti mogućnost promjene napona offseta. Za kreiranje offseta koristi se shema sa slike 4.2. Na slici 4.3. prikazan je sklop koji omogućava čujnu indikaciju uz korištenje djelitelja frekvencije CD4024.



Slika 4.2. Kreiranje offseta sa promjenljivim naponom offseta



Slika 4.3. Čujna indikacija koristeći CD4024

5. Svjetlosna indikacija

Pored čujne indikacije, potrebno je napraviti i svjetlosnu indikaciju. U radu se razmatraju dvije vrste svjetlosne indikacije: frekvencije i amplitude.

Svjetlosna indikacija frekvencije pomoću *LED* dioda pokazuje na kojoj frekvenci se nalazi signal sa ultrazvučnog senozora.

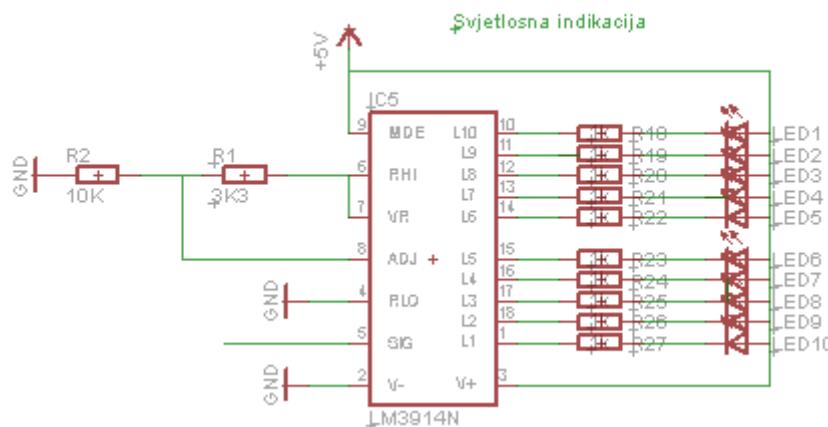
Svjetlosna indikacija amplitute pomoću *LED* dioda pokazuje amplitudu signala sa ultrazvučnog senozora.

Da bi omogućili traženu funkcionalnost koristi se kolo LM3914. Ovo kolo omogućava da se diode sekvensijalno uključuju promjenom ulaznog napona za određeni fiksni korak [7]. Pošto kolo sadrži 10 izlaza za diode, fiksni korak se određuje prema relaciji:

$$\text{korak} = \frac{V_{ref}}{10}, \quad (5.1.)$$

pri čemu je V_{ref} referentni napon i jednak je:

$$V_{ref} = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5.2.)$$



Slika 5.1. Shema spajanja kola LM3914

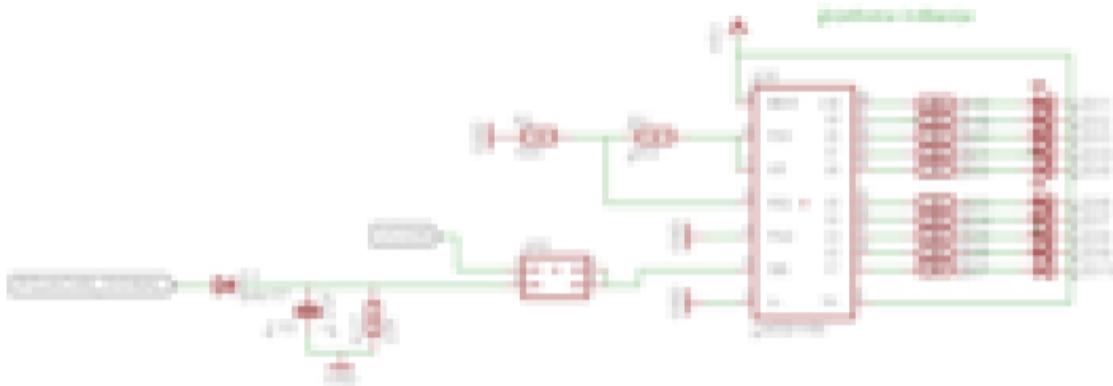
Na slici 5.1. je prikazana shema spajanja LM3914. Da bi se ostvario traženi zahtjev potrebno je odrediti vrijednosti otpornika. Koristi se 10 dioda i korak je 0.5. U tabeli 5.1. je prikazan odnos uključivanja dioda i ulaznog napona.

Ulagani napon [V]	Uključene diode
0–0.5	D1
0.5–1	D1, D2
1–1.5	D1, D2, D3
1.5–2	D1, D2, D3, D4
2–2.5	D1, D2, D3, D4, D5
2.5–3	D1, D2, D3, D4, D5, D6
3–3.5	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7
3.5–4	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8
4–4.5	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9
4.5–5	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10

Tabela 5.1. Ulagani naponi i uključene diode za amplitudu

Ako se za vrijednost koraka uzme $0.5V$ dobija se $V_{ref} = 5V$. Ako se to uvrsti u relaciju (5.2.) dobija se $R_2 = 3R_1$, i može se pretpostaviti da je $R_2 = 3R_1 = 10k\Omega$.

Koristeći prekidač moguće je mijenjati vrstu svjetlosne indikacije. Shema prikazana na slici 5.1. može da radi sa signalima niske frekvencije. Pošto je ultrazvučni signal visoke frekvencije dati sklop neće raditi na traženi način. Da bi se ta smetnja uklonila koristi se kondenzator koji će da akumulira napon. Pri smanjenju napona kondenzator će se prazniti pomoću otpora. Također, koristi se dioda koja propušta samo pozitivni dio signala. Vrijednosti ovih komponenti su utvrđene eksperimentalno i njihove vrijednosti kao i cijeli sklop zadužen za svjetlosnu indikaciju su prikazani na slici 5.2.

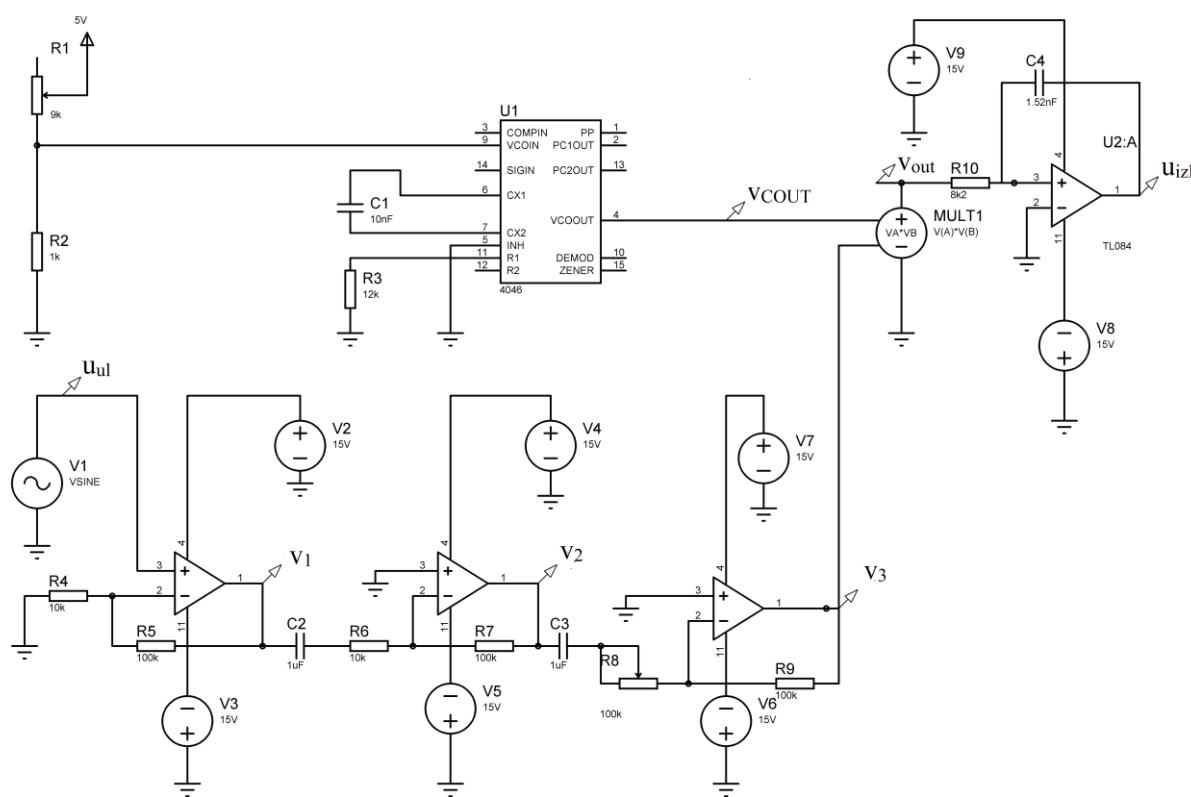
**Slika 5.2.** Svjetlosna indikacija

6. Simulacioni model ultrazvučnog detektora

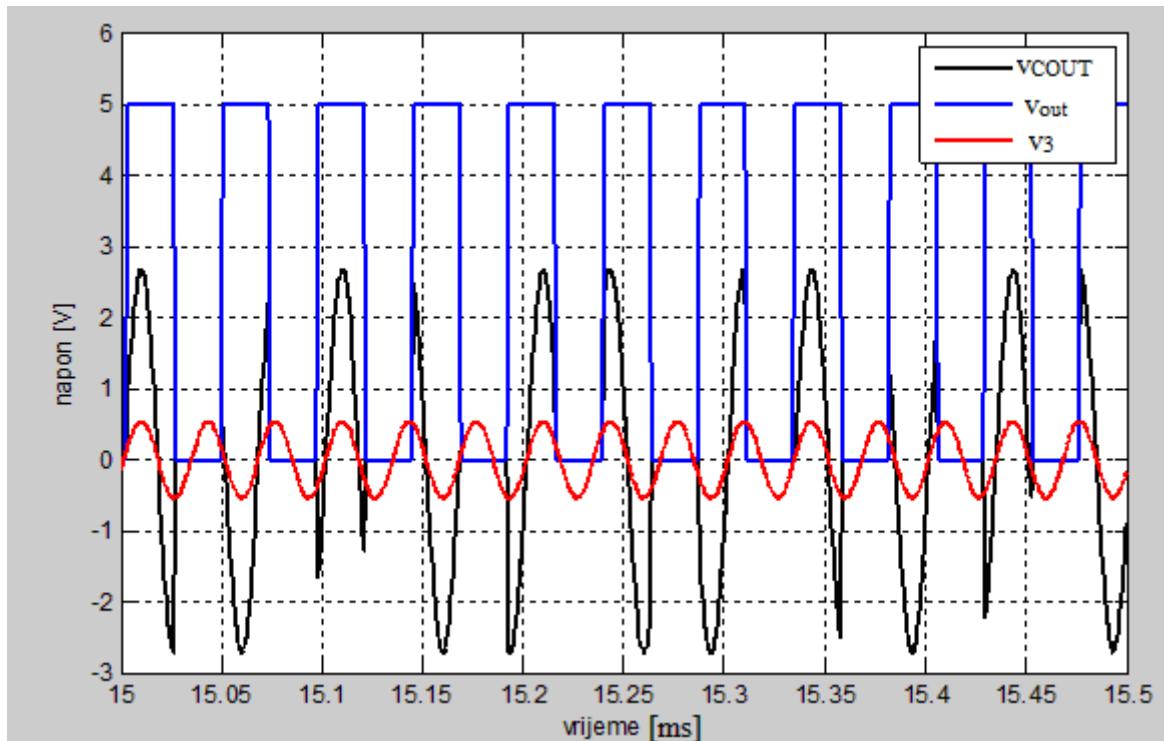
Model je izrađen u simulacionom programu *Proteus 7*. Zbog ograničenih mogućnosti modela nije moguće simulirati mikser NE612, pa se umjesto njega koristio idealni množač koji se nalazi u programu. Bitno je napomenuti da model kola 4046 u ovom simulacionom programu ima neke nepravilnosti, pa promjenom C_1 i R_1 se ne utiče na maksimalnu i minimalnu frekvenciju. To podešenje je potrebno napraviti u samom modelu kola, tako da se odabere maksimalna frekvencija koja odgovara za $VCO_{in} = 5V$. Koristeći relaciju (2.13) za izradu simulacije je odabrana vrijednost 202 kHz.

Odabir komponenti na slici 6.1. je pojašnjen u drugom i trećem poglavlju

Čujna indikacija



Slika 6.1. Simulacioni model ultrazvučnog detektora bez svjetlosne indikacije

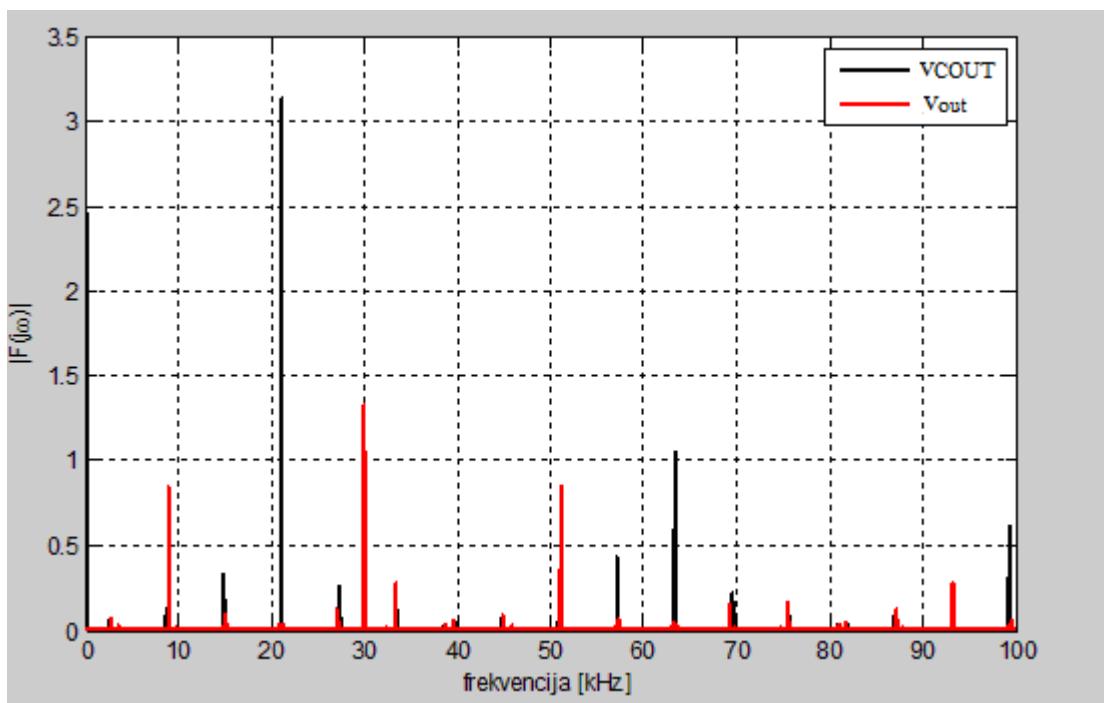


Slika 6.2. Signali v_{COUT} , v_{out} i v_3 u vremenskom domenu

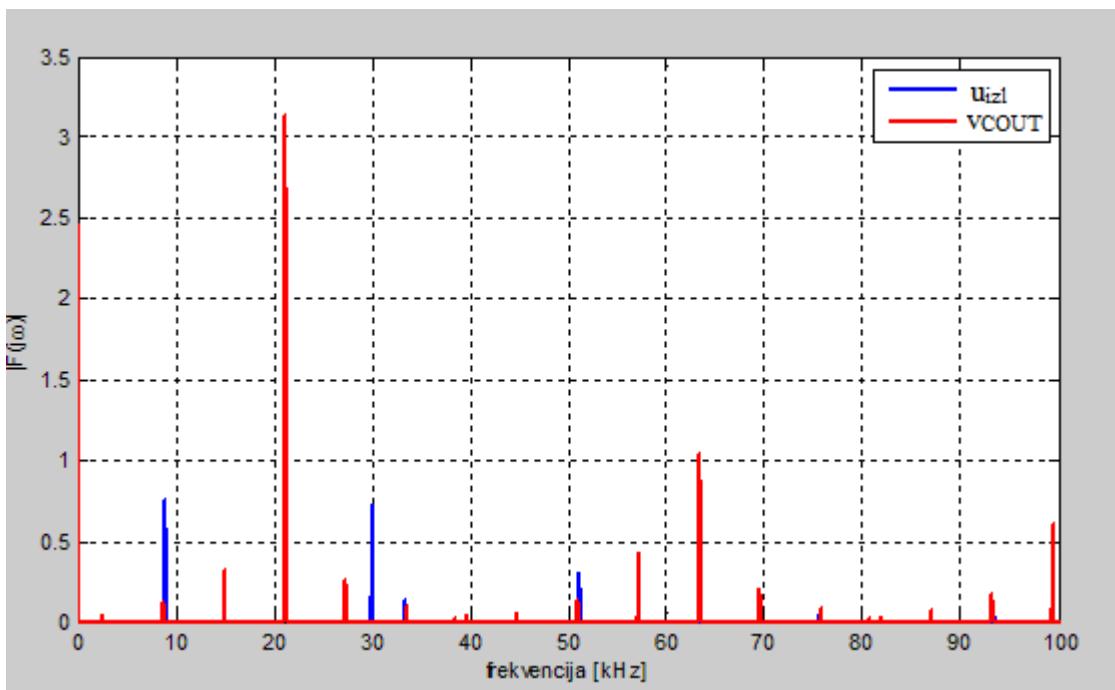
Slika 6.2. prikazuje vremenski domen signala ulaza, v_{COUT} i v_3 , i izlaza v_{out} iz množača. Osnovna svrha množenja signala u ovom radu je pomjerenje u frekventnom domenu. Na slici 6.3. se nalazi prikaz ovih signala u frekventnom domenu. U posmatranom slučaju kolo 4046 daje na izlazu četvrtke frekvencije 20 kHz, a ulazni signal je sinusnog talasnog oblika frekvencije 30 kHz. Pošto v_{COUT} nije sinusni signal, nego nesavršena četvrtka, on postoji i na frekvencijama različitim od 20 kHz. Međutim, njegova amplituda je najveća na 20 kHz. Također, signal ima istosmjernu komponentu i amplitudu na frekvenciji 65 kHz koje nisu zanemarive. Amplitude na ostalim frekvencijama su bar 10 puta manje od amplitude na 20 kHz. Izlaz iz množača v_{out} ima najveću amplitudu na frekvencijama 10, 30 i 50 kHz. Ljudsko uho će samo čuti frekvenciju na 10 kHz. Dakle, ulazni signal koji je bio na frekvenciji 30 kHz nakon množenja v_{COUT} ima najveću amplitudu na frekvenciji od 10 kHz.

Na slici 6.4. prikazan je izlazni signal u frekventnom domenu nakon prolaska kroz NF filter. Može se primjetiti da se znatno ne razlikuje od v_{out} na frekvencijama koje bilježi ljudsko uho. Za ulazni signal sinusnog talasnog oblika frekvencije 50 kHz, na slici 6.5 su prikazani signali v_{COUT} i u_{izl} u frekventnom domenu. u_{izl} ima najveću amplitudu za 11 kHz, a v_{COUT} za 39kHz. Dakle, ulazni signal koji je bio na frekvenciji 50 kHz nakon množenja v_{COUT} signalom ima najveću amplitudu na frekvenciji od 10 kHz. Na slici 6.6 je prikazan signal v_{out} u frekventnom domenu. Pomenuti signal ima najveću amplitudu za 50 kHz, a zatim na frekvencijama 11 kHz i 89 kHz. Nakon propuštanja kroz niskopropusni filter najveću amplitudu ima na frekvenciji 11 kHz.

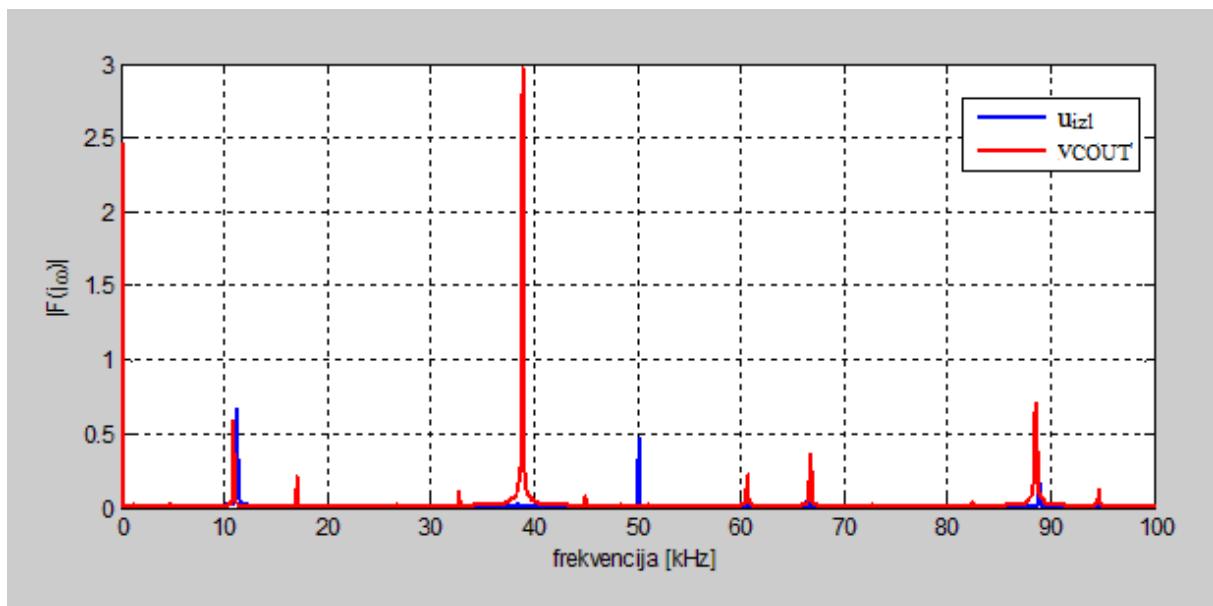
Dakle, množenjem ulaznog signala sa v_{COUT} signalom je moguće premjestiti ulazni signal sa viših na niže frekvencije koje ljudsko uho može da registruje. Na taj način je izvršena čujna indikacija signala.



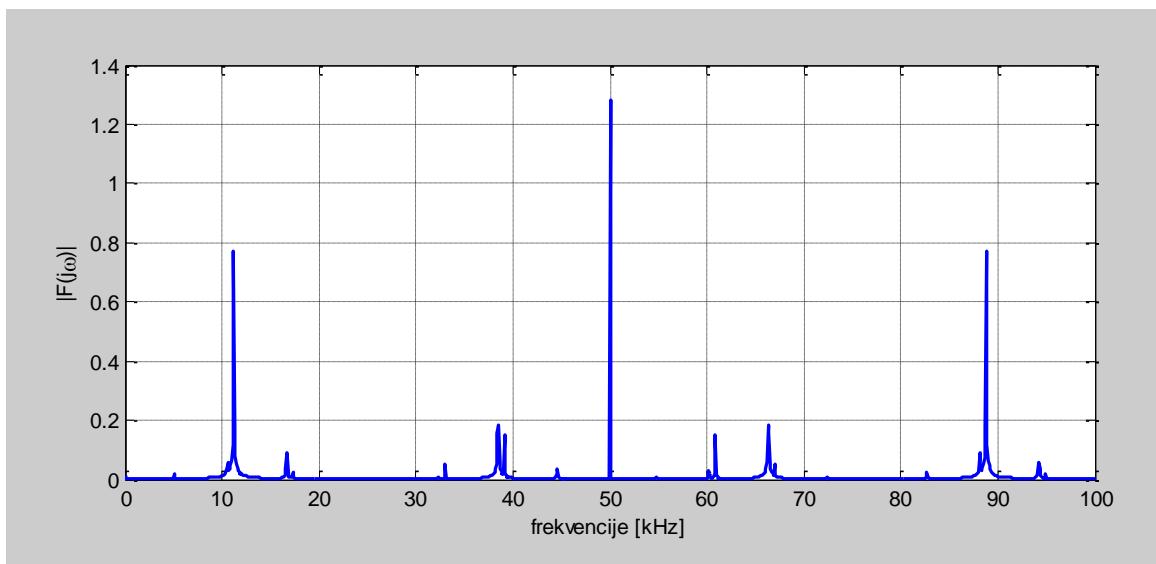
Slika 6.3. Signali v_{COUT} , v_{out} i v_3 u frekventnom domenu



Slika 6.4. Signali v_{COUT} i u_{izl} u frekventnom domenu



Slika 6.5. Signali v_{COUT} i u_{izl} u frekventnom domenu



Slika 6.6. Signali v_{out} u frekventnom domenu

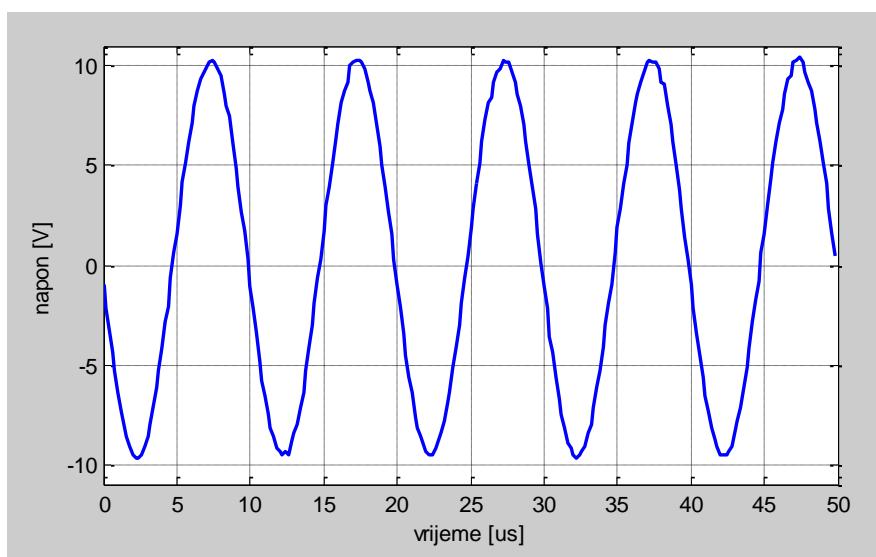
7. Izrada ultrazvučnog detektora na matadoru

7.1. Izrada pojačala na matadoru

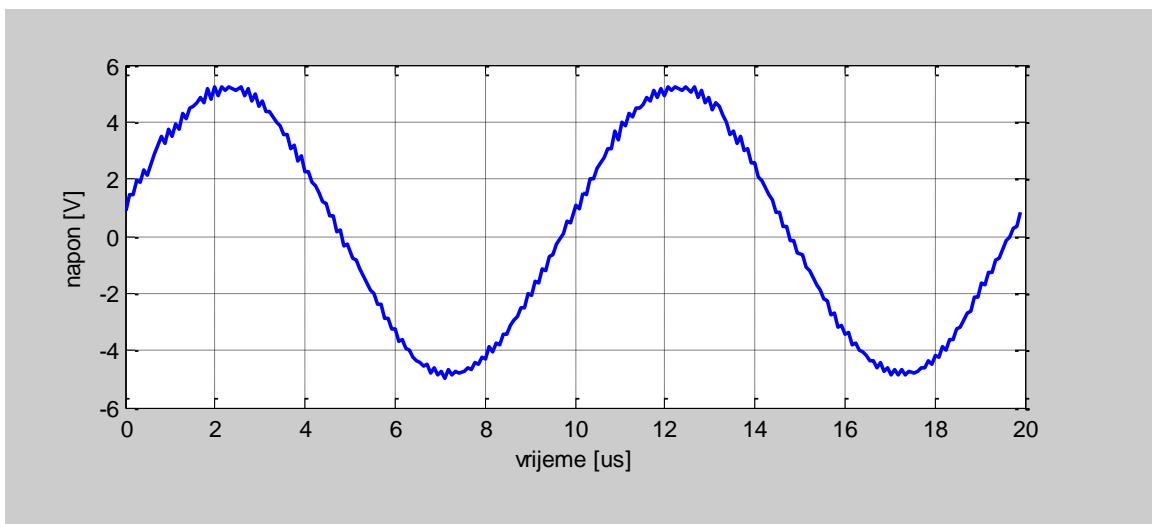
Za izradu pojačala korištena je shema prikazana na slici 3.4. Za vrijednost potenciometra R_8 se koristi $10k\Omega$, pa je pojačanje 1000.

Realno pojačalo ima ograničen frekventno-propusni opseg, pa se može desiti da za ulaze visoke frekvencije se dobije izobličen signal. Zbog toga se za provjeru rada pojačala kao ulaz koristi sinusni signal frekvencije 100 kHz kojeg daje generator funkcija.

Na slici 7.1. prikazan je izlazni signal nakon dvostepenog pojačanja od 100 za ulazni signal 100 mV. Signal ima amplitudu 10 V i nije izobličen.



Slika 7.1. Izlazni signal iz pojačala za ulazni signal amplitude 100 mV



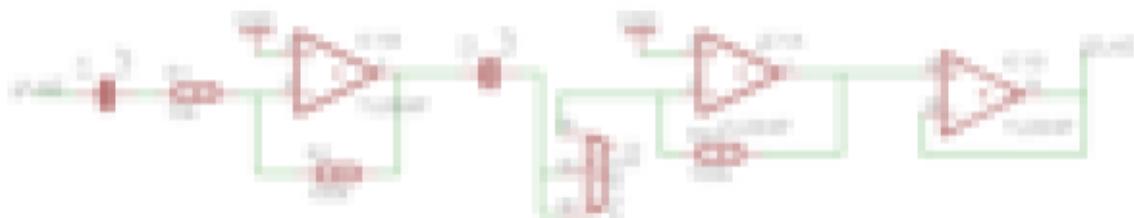
Slika 7.2. Izlazni signal iz pojačala za ulazni signal amplitude 50 mV

Također, izvršeno je testiranje sa ultrazvučnim prijemnikom i predajnikom koji je primao pobudu od generatora funkcija. Predajnik i prijemnik su postavljeni na dijametralno suprotnim stranama međusobno udaljeni za 10 cm. Kao prepreke su korišeni: metal, drvo i spužva. Za različite materijale amplituda izlaznog signala se mijenjala.

Nakon testiranja pojačala sa ultrazvučnim prijemnikom ustanovljeno je da dvostepeno pojačalo može dati odgovarajuće rezultate za slučaj ultrazvučnog prijemnika. Izlazni signal iz pojačala se koristi i u čujnoj i svjetlosnoj indikaciji, pa da bi se pojačalo izoliralo od ostatka sklopa može se koristiti naponsko sljedilo koje se stavlja nakon dvostepenog pojačala.

Nakon izvršenih promjena snimljen je izlaz pojačala čiji je ulazni signal sinusnog talasnog oblika 50 mV. Signal na izlazu ima amplitudu 5 V i nije izobličen (slika 7.2.). Dakle, pojačalo zadovoljava tražene uslove.

Optimizirana shema pojačala je prikazana na slici 7.3.

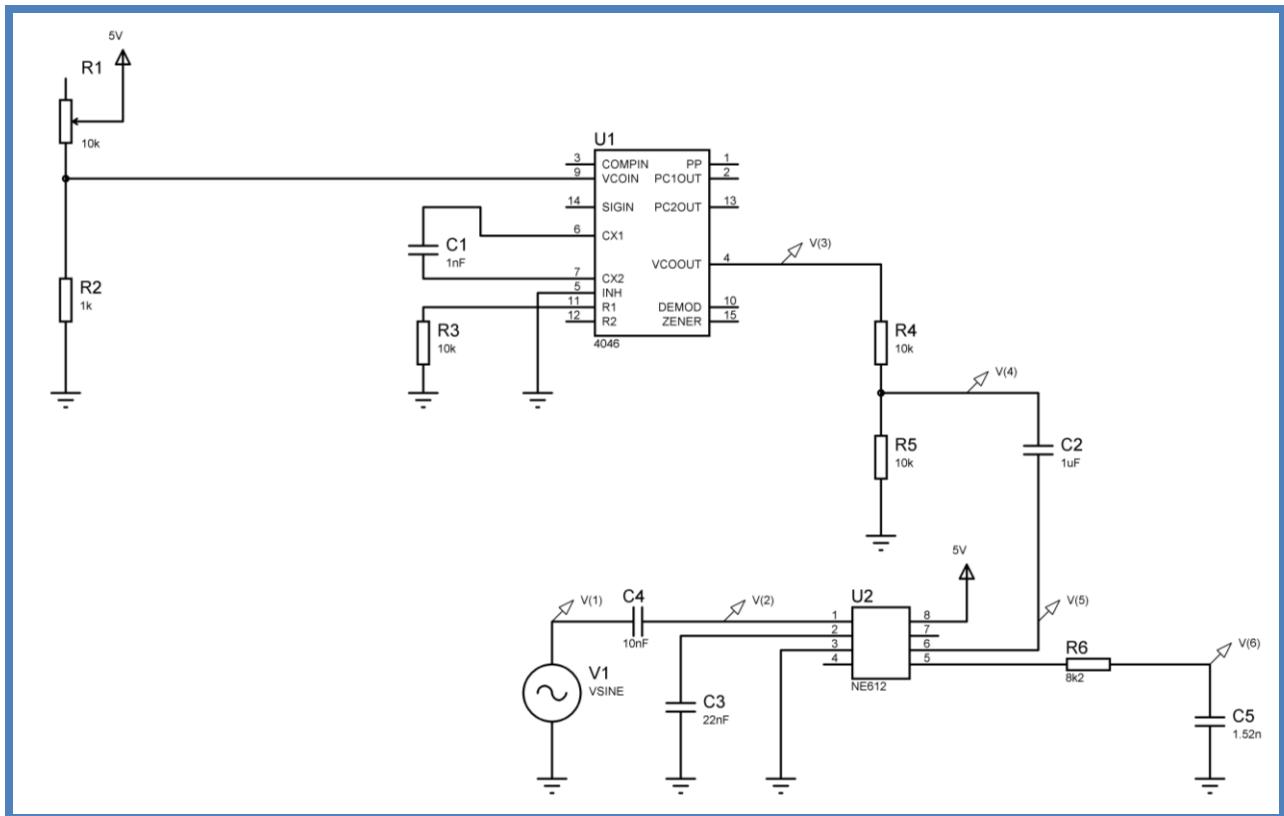


Slika 7.3. Optimizirana shema pojačala

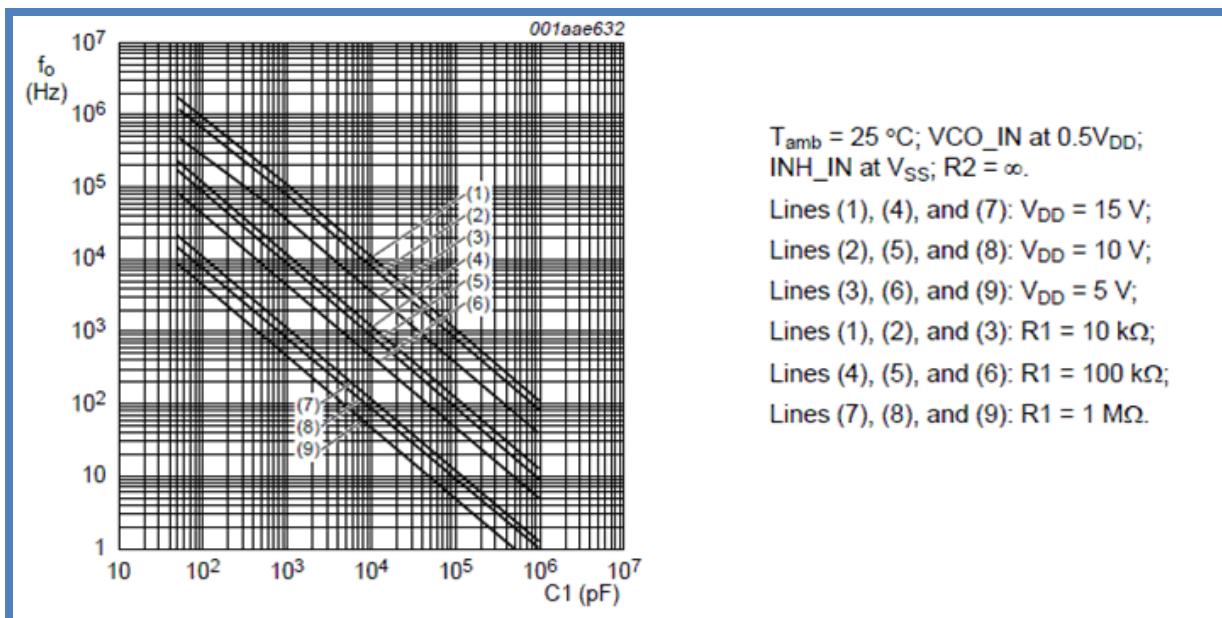
7.2. Izrada demodulatora na matadoru

Za izradu ultrazvučnog detektora koristi se model prikazan na slici 7.3.

Prilikom realne izvedbe sklopa uočeno je da model kola 4046 koji je korišten prilikom proračuna i simulacije nije isti onom sa kojim se vršila izrada na matadoru. Shodno tome su se koristile nove komponente. Za odabir komponenti se koristi slika 7.4. Da bi se postigla centralna frekvencija od 60kHz pri $V_{dd}=5V$ za vrijednost kondenzatora se može uzeti vrijednost 1nF. Može se pretpostaviti da je $R_2 \rightarrow \infty$ i $R_1 = 10k\Omega$.

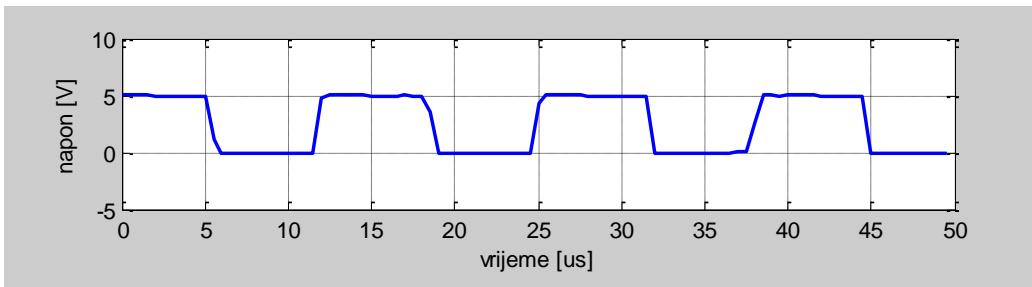


Slika 7.3. Model ultrazvučnog detektora



Slika 7.4. Centralna frekvencija u ovisnosti C_1 (slika preuzeta iz [4])

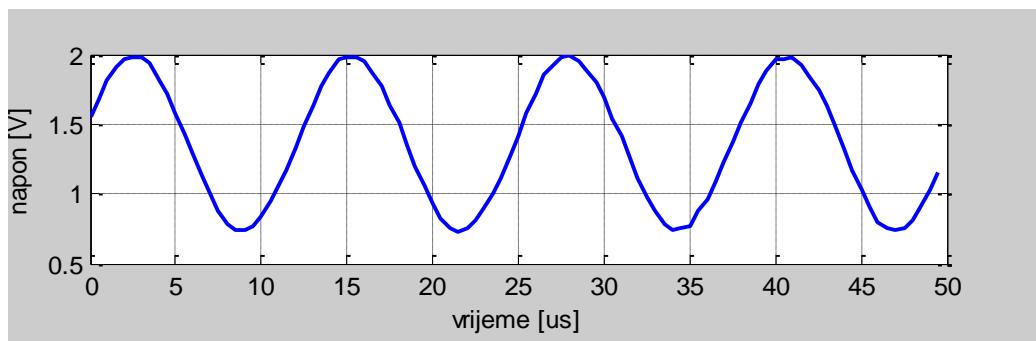
Za vrijednost ulaza $VCO_{in} = 1.36V$ na izlazu iz 4046 kola dobija se signal četvrtki frekvencije 20 kHz, a za vrijednost ulaza $VCO_{in} = 2.88V$ signal četvrtki frekvencije 60 kHz što je prikazano na slici 7.5. Dakle, promjenom vrijednosti ulaznog napona moguće je dobiti izlaz frekvencije 60 kHz koji je potreban za demodulaciju ulaznog signala.



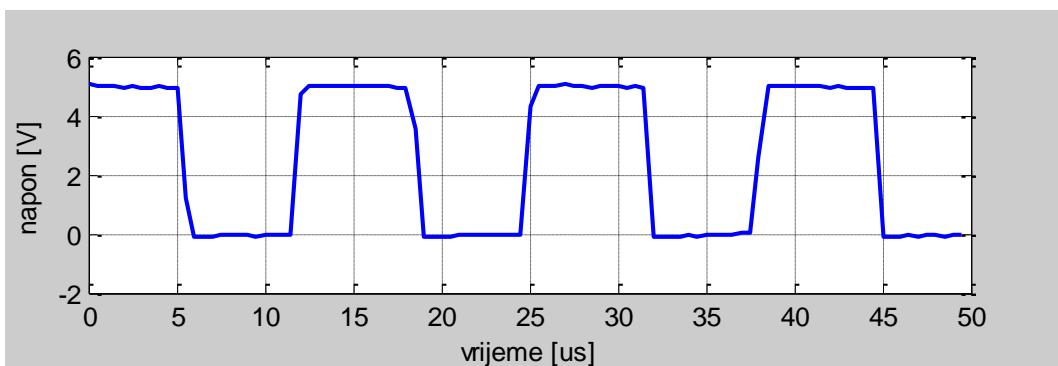
Slika 7.5. Izlaz iz 4046 kola

Ulagani signal u mikser je prikazan na slici 7.6. u vremenskom domenu, a na slici 7.9. u frekventnom domenu. Da bi se omogućila čujna indikacija potrebno je signal premjestiti u područje nižih frekvencija. Za demodulaciju se koristi izlaz sa 4046 kola frekvencije 76.5 kHz koji je prikazan na slici 7.7. u vremenskom domenu i na slici 7.10. u frekventnom domenu. Pomenuti signal je ujedno i drugi ulaz u mikser. Mikser vrši miješanje ova dva signala, a između većeg broja novostvorenih frekvencijskih komponenata filtriranjem se izdvaja ona željena. Koristi se niskopropusni filter granične učestanosti 20 kHz. Filter je postavljen na izlazu iz miksera. Izlazni signal sa filtera je prikazan u vremenskom domenu na slici 7.8.

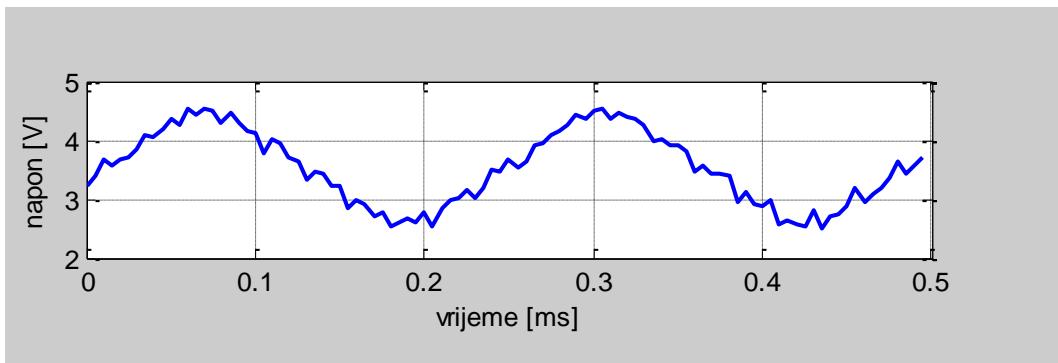
Na slici 7.11. je prikazan izlazni signal u frekventnom domenu. Signal sadrži istosmjernu komponentu, harmonike frekvencije 4.88 kHz, 10 kHz i neke harmonike iznad 20 kHz. Istosmjerna komponenta se pojavljuje zbog kondenzatora koji se nalaze na ulazu u mikser. Zbog neidealnosti opreme harmonici iznad 20 kHz uspjevaju proći kroz filter. Signal je najviši na frekvenciji od 4.88 kHz, pa se uspješno izvršila demodulacija. Signal je sličan sinusnom talasnom obliku uz mnogo šumova.



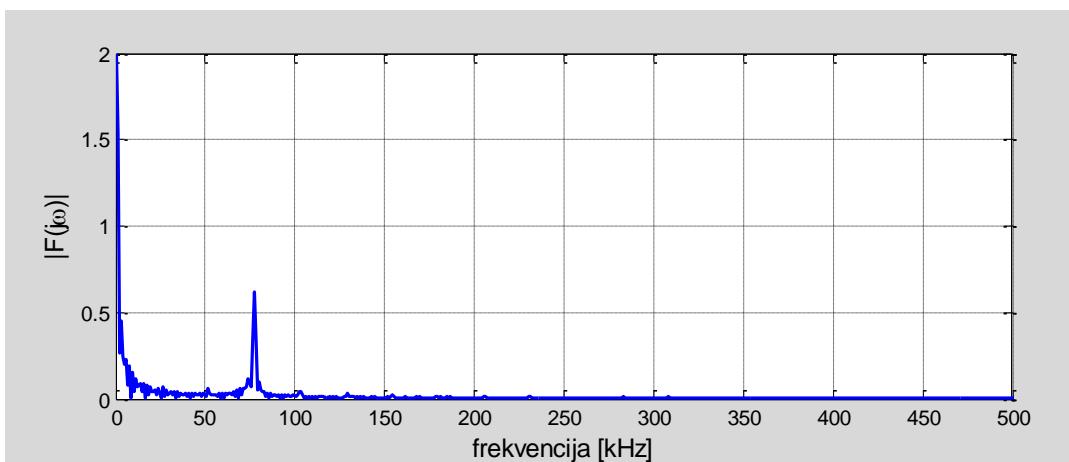
Slika 7.6. Ulazni signal u mikser frekvencije 80 kHz



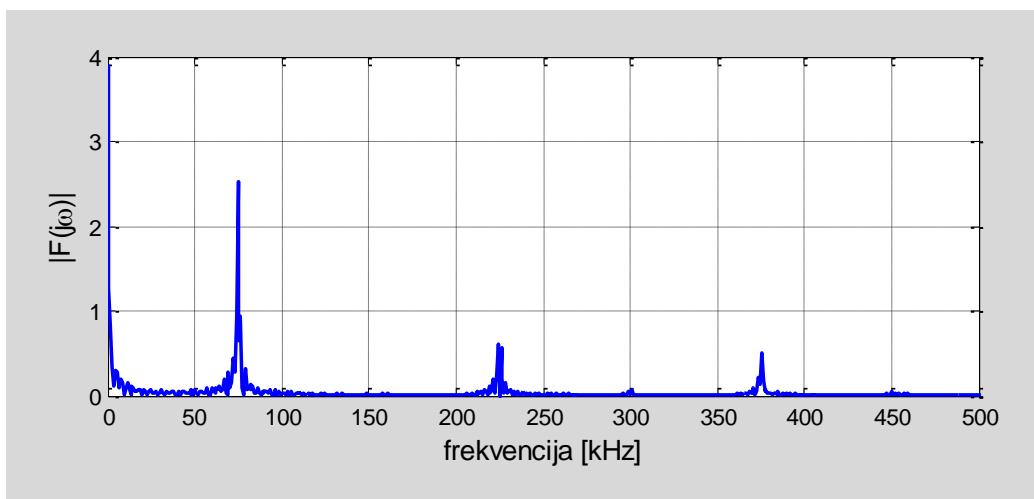
Slika 7.7. Izlaz sa 4046 kola frekvencije 76.5 kHz



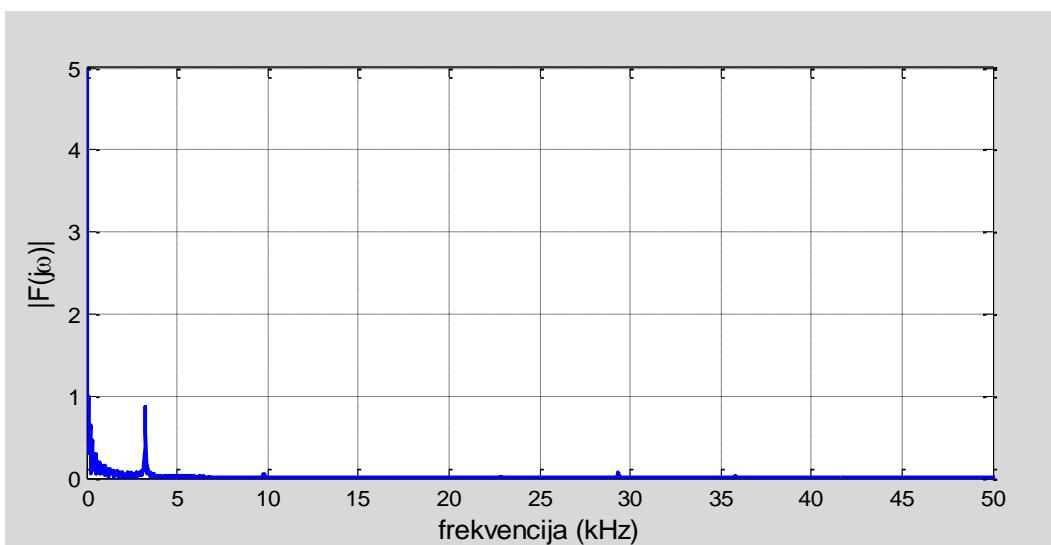
Slika 7.8. Izlazni signal sa filtera frekvencije 4.88 kHz



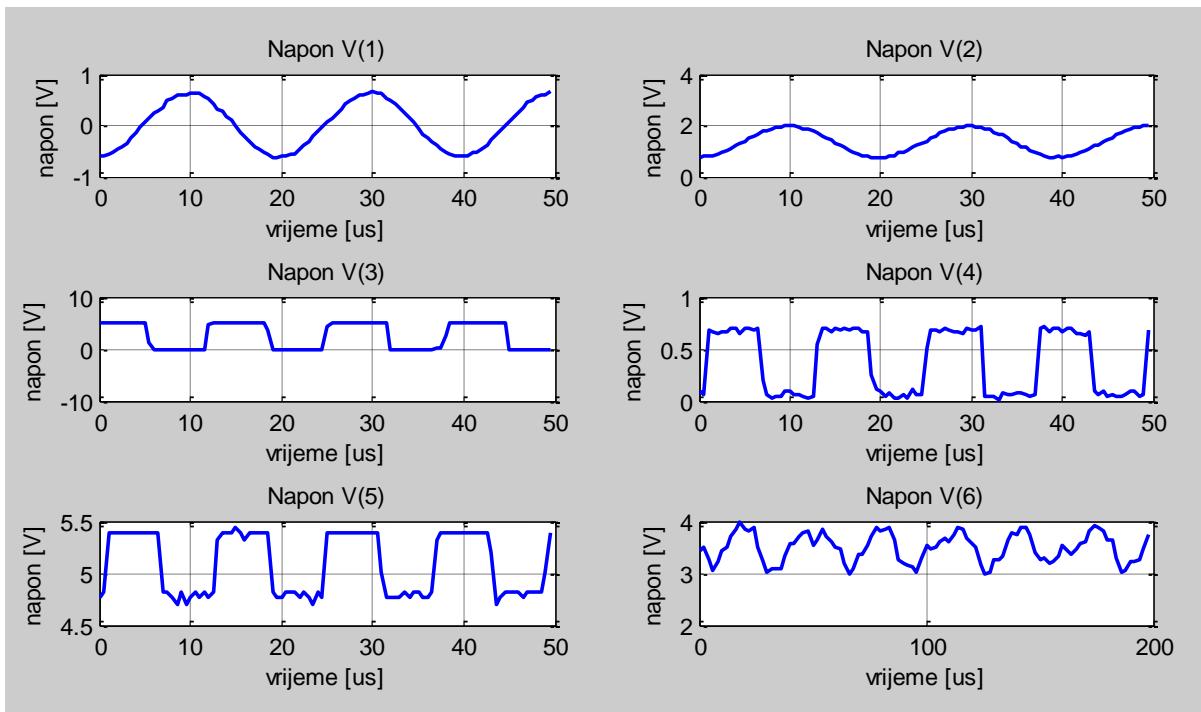
Slika 7.9. Spektar signala sa slike 7.6.



Slika 7.10. Spektar signala sa slike 7.7.



Slika 7.11. Spektar signala sa slike 7.8.



Slika 7.12. Prikaz signala u karakterističnim tačkama

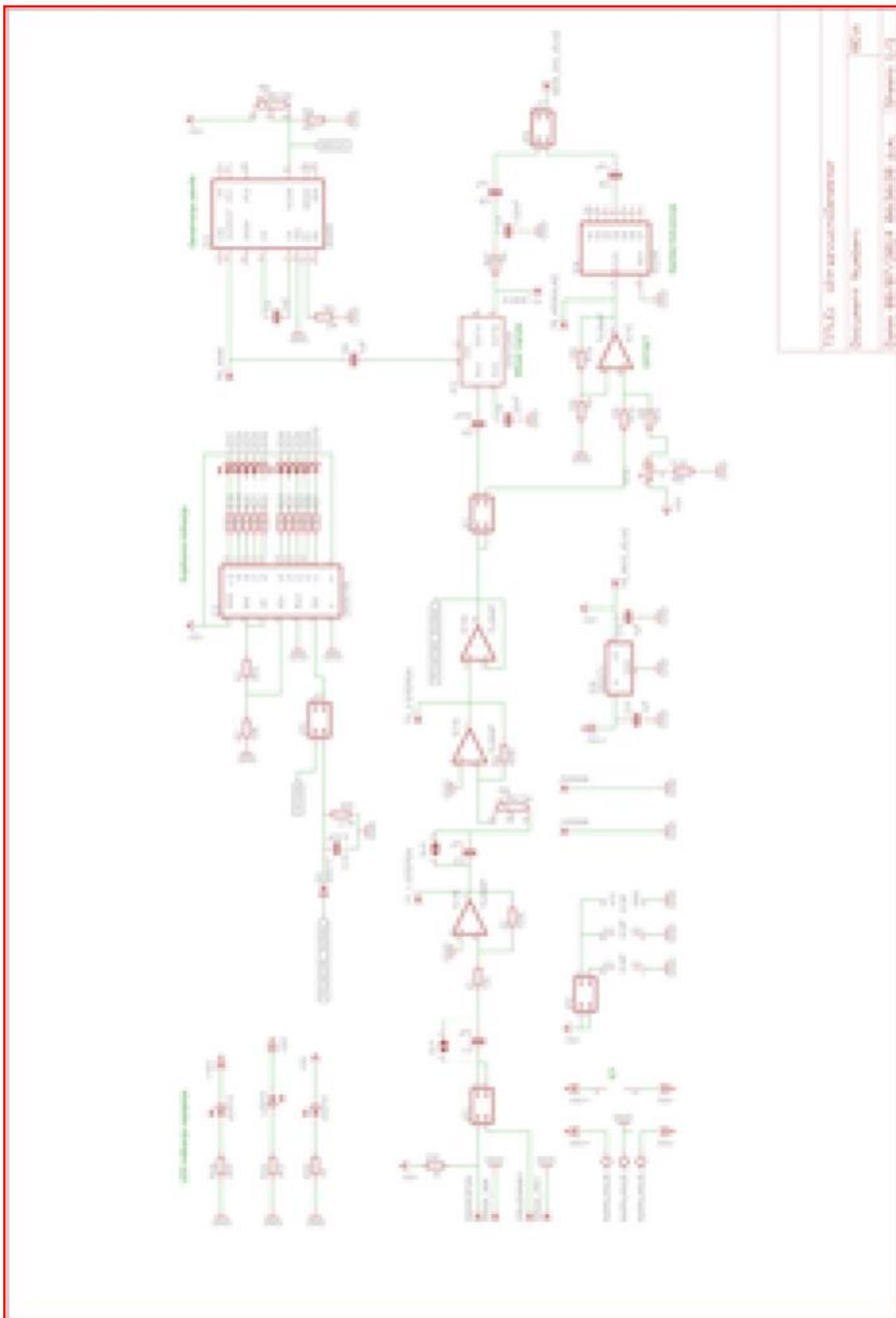
Na slici 7.12. prikazani signali u karakterističnim tačkama. Za ulazni signal V(1) frekvencije 50 kHz i signal četvrtke frekvencije 77 kHz dobija se izlazni signal frekvencije 28 kHz. Greška koja se pojavljuju je posljedica korištenja signala četvrtke umjesto signala sinusnog talasnog oblika, nepreciznog mjerjenja i šumova.

Dakle, demodulator zadovoljava tražene uslova.

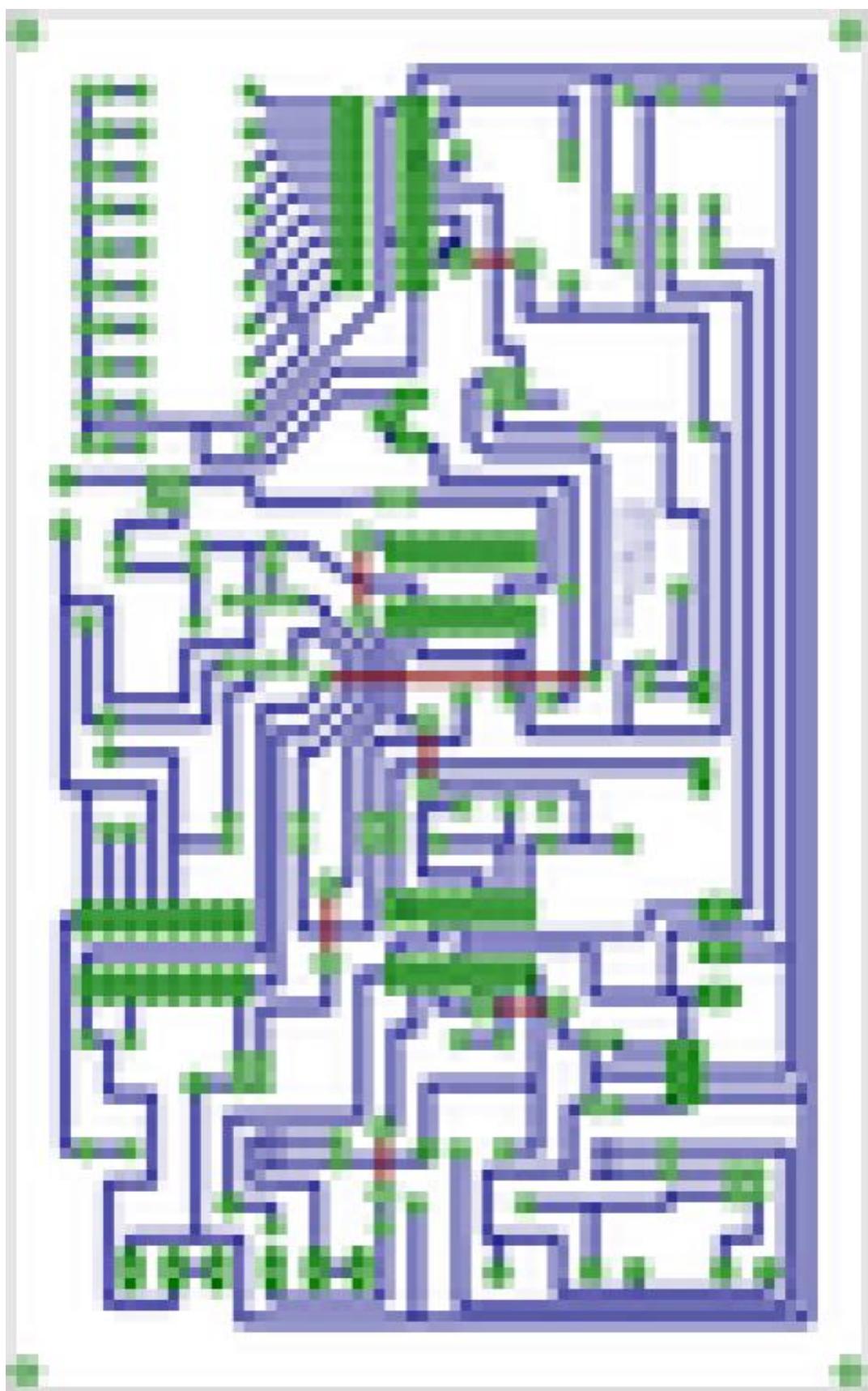
Nakon izbacivanja otpornika R_4 i R_5 tj. ako se izlaz kola 4046 spoji samo preko kondenzatora dobija se veća amplituda naizmjeničnog signala izlaza miksera. Zbog toga u konačnoj verziji se ne realiziraju ovi otpornici. Također, zbog nemogućnosti korištenja potenciometra koji ima maksimalnu vrijednost otpora $10k\Omega$ se mijenja vrijednosti otpornika R_2 . Potenciometar koji se koristi ima maksimalnu vrijednost otpora $100k\Omega$, pa se za vrijednost otpora R_2 usvaja otpornost od $12k\Omega$.

8. Izrada štampane pločice

Za izradu štampane pločice korišten je program Eagle 5.11. Pločica je jednostrana i ima dimenzija 160x100 mm. Na slici 8.1. prikazana je shema sklopa za izradu pločice. Dodatni prekidači na shemi sklopa služe za izbor ulaznog signala (mikrofon ili ultrazvučni prijemnik), načina čujne indikacije i vrstu svjetlosne indikacije. Dizajn pločice je prikazan na slici 8.2. Plavom bojom su označene rute koje su odštampane na pločici dok su crvenom označene rute koje su se morale kratko spojiti nakon što je pločica urađena.



Slika 8.1. Shema sklopa za izradu štampane pločice



Slika 8.2. Dizajn pločice

9. Snimanje karakteristika sklopa

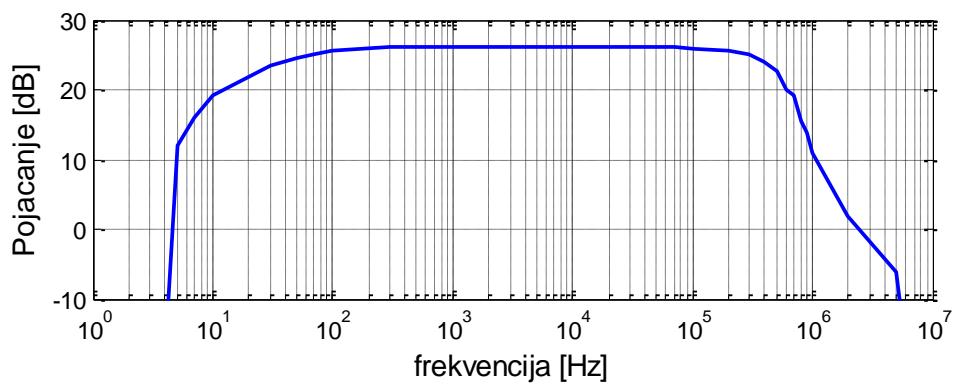
9.1. Amplitudno-frekventna karakteristika prijemnog pojačala

Amplitudno-frekventna karakteristika prijemnog pojačala je snimljena korištenjem generatora funkcija i ultrazvučnog detektora. Generator je korišten kao izvor sinusnog signala čija se frekvencija mijenjala. Promjena frekvencije uzrokovala je promjenu pojačanja prijemnog pojačala koji se nalazi unutar ultrazvučnog detektora. U tabeli 9.1. prikazane su snimljene vrijednosti, a na slici 9.1 amplitudno-frekventna karakteristika prijemnog pojačala.

Frekvencija f [Hz]	Pojačanje A [dB]
1	-∞
3	-∞
5	12.04
7	15.92
10	19.32
30	23.38
50	24.61
70	25.11
100	25.58
300	26.02
500	26.02
700	26.02
1000	26.02
3000	26.02
5000	26.02
7000	26.02
10000	26.02

Frekvencija f [Hz]	Pojačanje A [dB]
20000	26.02
30000	26.02
50000	26.02
70000	26.02
100000	25.80
200000	25.58
300000	25.11
400000	24.08
500000	22.61
600000	20.00
700000	19.08
800000	15.56
900000	13.98
1000000	10.88
2000000	1.98
5000000	-6.02
10000000	-∞

Tabela 9.1. Ovisnost pojačanja od frekvencije za prijemno pojačalo



Slika 9.1. Amplitudno-frekventna karakteristika pojačala

Na frekvencijama od 300 Hz do 100 kHz pojačanje ima konstantnu vrijednost 20 i ne ovisi o frekvenciji. U područjima nižih i viših frekvencija ima određeni pad pojačanja. Frekvencije u kojoj pojačanje dostiže $\frac{1}{\sqrt{2}}$ konstantne vrijednosti nazivaju se granične frekvencije. Za

testirano prijemno pojačalo one približno iznose 30 Hz i 400 kHz. U ovom opsegu se smatra da pojačalo zadovoljava uslov linearnosti amplitudne karakteristike. S obzirom da je signal sa ultrazvučnog senzora u datom frekventnom opsegu pojačalo zadovoljava traženi uslov linearnosti amplitude i ne pravi izobličenja signala.

9.2. Amplitudno-frekventna karakteristika prijemno-predajnog sklopa

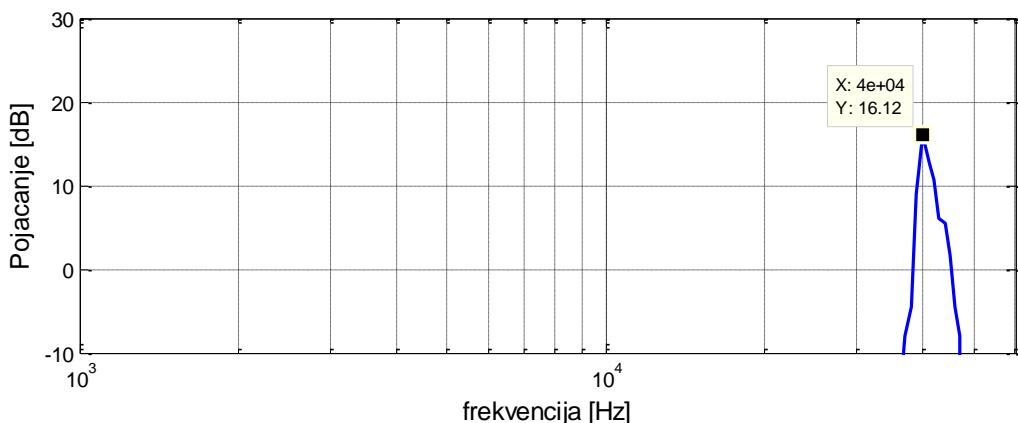
Amplitudno-frekventna karakteristika prijemno-predajnog sklopa je snimljena koristeći ultrazvučni predajnik i njegovo pojačalo, prijemno pojačalo sa ultrazvučnim prijemnikom i generator funkcija. Generator je stvarao pobudu za ultrazvučni predajnik u obliku sinusnog signala čija se frekvencija mijenjala. Promjena frekvencije uzrokovala je promjenu pojačanja. U tabeli 9.2. prikazane su snimljene vrijednosti, a na slici 9.2 amplitudno-frekventna karakteristika prijemno-predajnog sklopa.

Frekvencija f [Hz]	Pojačanje A [dB]
1	-∞
3	-∞
5	-∞
7	-∞
10	-∞
100	-∞
500	-∞
1000	-∞
3000	-∞
5000	-∞
10000	-∞
20000	-∞
30000	-∞
35000	-∞

Frekvencija f [Hz]	Pojačanje A [dB]
36000	-13.98
37000	-7.96
38000	-4.44
39000	8.94
40000	16.12
41000	12.87
42000	10.63
43000	6.02
44000	5.58
45000	1.58
46000	-4.44
47000	-7.96
48000	-∞
50000	-∞

Tabela 9.1. Ovisnost pojačanja od frekvencije za prijemno-predajni sklop

Najveće pojačanje se dostiže na frekvencija od 40 kHz. Na frekvencijama od 39 kHz do 45 kHz pojačanje u decibelima ima pozitivnu vrijednost, a u svim ostalim slučajevima je negativno.



Slika 9.2. Amplitudno-frekventna karakteristika prijemno-predajnog sklopa

9.3. Karakteristika usmjerenosti senzora

Karakteristika usmjerenosti senzora je snimljena koristeći ultrazvučni predajnik i njegovo pojačalo, prijemno pojačalo sa ultrazvučnim prijemnikom, mapu sa označenim uglovima i generator funkcija. Generator je stvarao pobudu za ultrazvučni predajnik u obliku sinusnog signala čija se frekvencija iznosila 40 kHz. Ultrazvučni prijemnik je bio fiksiran u centru mape, a ultrazvučni predajnik je pravio polukružnicu poluprečnika 1m po mapi. Promjena ugla prilikom pomjeranja predajnika je pravila različite vrijednosti pojačanja. U tabeli 9.3. prikazane su snimljene vrijednosti, a na slici 9.3 karakteristika usmjerenosti senzora. Karakteristika je dobijena koristeći *matlab* funkciju *polar(ugao, A)*.

Maksimalno pojačanje se dostiže za ugao od 90° i iznosi 22.5.

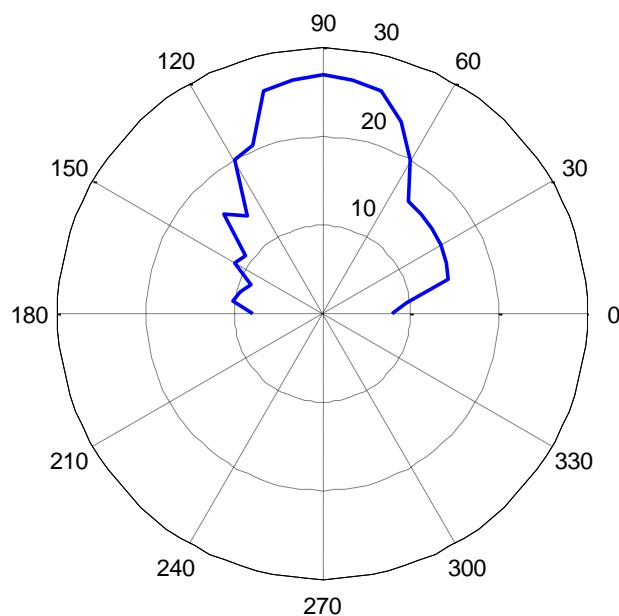
Za vrijednosti ugla od 75° do 105° vrijednost pojačanja je iznad 20. Za sve ostale vrijednosti pojačanje opada i nalaze se ispod $\frac{1}{\sqrt{2}}$ maksimalne vrijednosti pojačanja. Na osnovu toga

slijedi da senzor za iste vrijednosti udaljenosti daje različite rezultate. Najpreciznije vrši mjerenje objekata koji se nalaze tačno ispred njega tj. pod uglom od 90° . Također, može se usvojiti da mu je područje sigurnog rada za vrijednosti ugla od 75° do 105° jer ne dolazi do velikog smanjenja amplitude.

Ugao [°]	Pojačanje A [dB]
0	7.96
7.5	9.54
15	14.87
22.5	15.19
30	15.56
37.5	15.74
45	15.92
52.5	15.92
60	20
67.5	23.52
75	26.02
82.5	26.55
90	27.04

Ugao [°]	Pojačanje A [dB]
97.5	26.55
105	26.02
112.5	20.63
120	20
127.5	13.98
135	15.92
142.5	10.88
150	11.48
157.5	8.79
165	9.54
172.5	10.24
180	7.96

Tabela 9.3. Ovisnost pojačanja od promjene ugla



Slika 9.3. Karakteristika usmjerenosti senzora

10. Zaključak

Tema rada je bila konstruisati ultrazvučni detektor, sklop koji će omogućiti čujnu i svjetlosnu indikaciju ultrazvuka u posmatranom okruženju. U prvom dijelu obrađena je teorija modulacije i demodulacije. Nakon osnovnih pojmova, razmatrani su načini izvršenja čujne indikacije: izrada demodulatora i djelitelja frekvencije. Pored toga urađen je i model pojačala i dvije vrste svjetlosne indikacije. Za sve navedene elemente je izvršen potrebni proračun.

U drugom dijelu izvršena je simulacija elemenata sklopa razmatranih u prvom dijelu rada.

Proračun izvršen u prvom dijelu je potvrđen simulacijom. Nakon uspješnih rezultata izvršen je eksperiment na matadoru. Za sve elemente sklopa eksperiment se slagao sa proračunom i simulacijom osim za generator četvrtki (kolo 4046). Vrijednosti komponenti za ovo kolo su utvrđeni eksperimentalno pri čemu je omogućeno da maksimalna frekvencija četvrtki na izlazu kola bude veća od 80 kHz. Također, ustanovljeno je da dvostepeno pojačalo može dati odgovarajuće rezultate za slučaj ultrazvučnog prijemnika. Izlazni signal iz pojačala se koristi i u čujnoj i svjetlosnoj indikaciji, pa da bi se izoliralo od ostatka sklopa koristi se naponsko sljedilo koje se stavlja nakon dvostepenog pojačala. Poslije optimizacije eksperimenta na matadoru napravljena je elektronska štampana pločica. Nakon eksperimenta sa štampanom pločicom ustanovljeno je da se sklop može koristiti za provjeru rada ultrazvučnog senzora, određivanje približne frekvencije i intenziteta ultrazvučnog signala sa senzora.

Korištenjem pločice snimljena je karakteristika usmjerenosti senzora i amplitudno-frekventne karakteristike prijemnog pojačalo i prijemno-predajnog sklopa. Iz karakteristika je moguće zaključiti da prijemno pojačalo ne vrši izobličenje amplitude za frekvencije od 30 Hz do 400 kHz, a pošto se unutar tog opsega nalazi ultrazvučni signal prijemno pojačalo ispunjava tražene zadatke. Najveće pojačanje se dobiva ako se predajnik pobuđuje sinusnim signalom frekvencije 40 kHz. Na karakteristici usmjerenosti senzora je moguće uočiti područje sigurnog rada 75° - 105° .

11. Literatura

- [1] Cytron Technologies, HC-SR04 Ultrasonic Sensor Datasheet
- [2] Melita Ahić-Đokić, "Signali i sistemi", Elektrotehnički fakultet Sarajevo, 2010.
- [3] Cleon Petty, Gary Tharalson, Marten Smith, "Configuring and Applying the MC74HC4046A Phase-Locked Loop"
- [4] NXP, HEF4046B Datasheet
- [5] Philips Semiconductors, SA612 Datasheet, 1990.
- [6] NXP Semiconductors, HEF4024B, 2011
- [7] Texas Instruments, LM3914 Datasheet, 2013.

Lista skraćenica

- AM** - amplitudno modulirani signal
- AIM** - amplitudno impulsna modulacija
- IKM** - impulsno kodna modulacija
- IPM** - impulsno položajna modulacija
- ITM** - impulsna modulacija po trajanju impulsa ili širinsko impulsna modulacija
- OP** - operaciono pojačalo
- PM** - fazno modulirani signal