

Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Odsjek za telekomunikacije

ULTRAZVUČNI USMJERENI ZVUČNIK

Završni rad

I ciklusa studija

Mentor:

Doc. dr Emir Sokić

Kandidat:

Muamer Boja

Sarajevo, juli 2017

Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Telekomunikacije
Završni rad I ciklusa studija

Izjava o autentičnosti radova

Seminarski rad, završni (diplomski odnosno magistarski) rad za I i II ciklus studija i integrirani studijski program I i II ciklusa studija, magistarski znanstveni rad i doktorska disertacija¹

Ime i prezime: Muamer Boja
Naslov rada: Ultrazvučni usmjereni zvučnik
Vrsta rada: Završni rad I ciklusa studija
Broj stranica: 43

Potvrđujem:

- da sam pročitao/la dokumente koji se odnose na plagijarizam, kako je to definirano Statutom Univerziteta u Sarajevu, Etičkim kodeksom Univerziteta u Sarajevu i pravilima studiranja koja se odnose na I i II ciklus studija, integrirani studijski program I i II ciklusa i III ciklus studija na Univerzitetu u Sarajevu, kao i uputama o plagijarizmu navedenim na web stranici Univerziteta u Sarajevu;
- da sam svjestan/na univerzitetskih disciplinskih pravila koja se tiču plagijarizma;
- da je rad koji predajem potpuno moj, samostalni rad, osim u dijelovima gdje je to naznačeno;
- da rad nije predat, u cjelini ili djelimično, za stjecanje zvanja na Univerzitetu u Sarajevu ili nekoj drugoj visokoškolskoj ustanovi;
- da sam jasno naznačio/la prisustvo citiranog ili parafraziranog materijala i da sam se referirao/la na sve izvore;
- da sam dosljedno naveo/la korištene i citirane izvore ili bibliografiju po nekom od preporučenih stilova citiranja, sa navođenjem potpune reference koja obuhvata potpuni bibliografski opis korištenog i citiranog izvora;
- da sam odgovarajuće naznačio/la svaku pomoć koju sam dobio/la pored pomoći mentora/ice i akademskih tutora/ica.

Mjesto, datum _____

Potpis _____

¹ U radu su korišteni slijedeći dokumenti: *Izjava autora* koju koristi Elektrotehnički fakultet u Sarajevu; *Izjava o autentičnosti završnog rada* Centra za interdisciplinarnе studije – master studij „Evropske studije”, *Izjava o plagijarizmu* koju koristi Fakultet političkih nauka u Sarajevu.

Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Odsjek za telekomunikacije
Doc. dr Emir Sokić

Teme za završni rad

studenata I ciklusa studija koji studiraju na ETF-u u skladu sa principima Bolonjskog procesa

na Odsjeku za telekomunikacije (ak.g. <2016/17>)

Tema: Ultrazvučni usmjereni zvučnik

Kandidat: Muamer Boja

Tema:

Usmjereni zvučnik je zvučnik sa veoma usmjerenim dijagramom zračenja. Za razliku od običnih zvučnika koji generišu zvuk koji se može čuti u širokom prostoru oko zvučnika, usmjereni zvučnici generišu uski snop zvučnog signala koji se može čuti samo neposredno ispred zvučnika. Primjena takvih zvučnika je česta u vojnim upotrebama, muzejima, marketingu i sl, gdje je potrebno prenijeti zvučnu poruku bez ometanja ostalih učesnika. Usmjereni zvučnici su bazirani na ultrazvučnim predajnicima, tako da se demodulacija posmatranog signala realizira samo na čvrstom objektu na koji je zvuk usmjeren. U okviru rada je potrebno teoretski analizirati, dizajnirati, izraditi i testirati elektronički sklop koji oponaša ultrazvučni usmjereni zvučnik.

Postavka zadatka:

U okviru rada potrebno je:

- dati osnovni pregled literature,
- osmisliti i dizajnirati sklop na bazi ultrazvučnih primopredajnih senzora koji omogućava dizajn zvučnika sa usmjerrenom polarnom karakteristikom,
- testirati prototip u simulacionom okruženju,
- dizajnirati i izraditi odgovarajuću elektroničku ploču,
- testirati sintetizirani zvučnik u realnom okruženju.

Koncept i metode rješavanja:

Rad se treba sastojati iz sljedećih cjelina:

- Pregled literature,
- Analiza postojećih klasičnih zvučnika i aktuatora za usmjerene zvučnike,
- Dizajniranje elektroničke strukture korištenjem odgovarajućih softverskih alata (PCB Eagle, Proteus i sl.),
- Izrada odgovarajuće elektroničke strukture
- Eksperimentalna analiza.

Osnovna literatura:

- [1] Fraden, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [2] Morris, Alan S. "Measurement and instrumentation principles." (2001): 1743.
- [3] Gan, Woon-Seng, Jun Yang, and Tomoo Kamakura. "A review of parametric acoustic array in air." *Applied Acoustics* 73.12 (2012): 1211-1219.
- [4] Shi, Chuang, and Woon-Seng Gan. "Development of parametric loudspeaker." *IEEE potentials* 29.6 (2010): 20-24.
- [5] Brooks, Laura A., Anthony C. Zander, and Colin H. Hansen. "Investigation into the feasibility of using a parametric array control source in an active noise control system." *Proceedings of ACOUSTICS*. 2005.
- [6] James, J. C., and O. N. Joseph. "Theory, history, and the advancement of parametric loudspeakers." *White Paper, American Technology Corporation, Diego, CA* (2002).
- [7] Tan, Ee-Leng, Woon-Seng Gan, and Jun Yang. "Preprocessing techniques for parametric loudspeakers." *Audio, Language and Image Processing, 2008. ICALIP 2008. International Conference on*. IEEE, 2008.
- [8] Miura, Kazunori. "Ultrasonic Directive Speaker." *Elektor Magazine* 3 (2011): 2011.

Zahvala:

Veliku zahvalu dugujem mentorima prof. dr Meliti Ahić-Đokić i doc. dr Emiru Sokiću koji su mi pomagali tokom izrade ovog završnog rada i koji su izradu ovog rada učinili interesantnim iskustvom.

Također, zahvaljujem se svojim prijateljima i porodicu koji su bili uz mene tokom cijelog studija.

Sažetak

U okviru rada je prezentovan princip rada i način izrade ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika. Ultrazvučni usmjereni zvučnik je zvučnik sa izuzetno usmjerenim dijagramom zračenja. Objasnjen je način generisanja usmjerjenog snopa zvuka. Također, obrađene su i modulacije karakteristične za ultrazvučni usmjereni zvučnik. Prikazani su i vremenski oblici signala dobijenih tokom testiranja zvučnika.

Osnovni cilj izrade sklopa je da se provjeri da li je moguće konstruisati sklop koji će zvuk emitovati u veoma uskom snopu.

Abstract

This paper presents the ultrasonic directional loudspeaker, its working principle and the procedure of construction. Ultrasonic directional loudspeaker is a loudspeaker with a highly directed radiation pattern. Procedure of generating directive sound beam and common modulation techniques used for the purposes of signal processing of a loudspeaker are explained in this paper. Waveforms of a sound generated by the directional loudspeaker are also presented.

The main purpose of making this loudspeaker is to check if it is possible to construct a device which can transmit sharp sound beam.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Uvod u signale	2
2.1. Signali i sistemi	2
2.2. Podjela signala.....	2
3. Zvučnici.....	4
3.1. Klasični zvučnici	4
3.2. Usmjereni zvučnici	5
3.3. Bliska i daleka zona zračenja	7
4. Senzori i pretvarači.....	9
4.1. Kriteriji za izbor pretvarača.....	9
4.2. Piezoelektrični efekat.....	9
4.3. Piezoelektrični i ultrazvučni pretvarači	10
5. Modulacione sheme.....	11
5.1. Dvostrana amplitudna modulacija – DSB AM.....	13
5.2. Square-root amplitudna modulacija – SR AM	14
5.3. Jednostrana amplitudna modulacija – SSB AM.....	15
5.4. Širinsko impulsna modulacija – PWM	16
5.5. Izbor frekvencije nosioca za modulaciju signala.....	17
6. Izrada ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika	18
6.1. Princip rada integralnog kola TL494	19
6.2. Opis integralnog kola IR2111	21
7. Simulacija ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika na matadoru	22
8. Izrada štampanih pločica	24
9. Demodulacija signala	29
10. Primjena ultrazvučnih usmjerjenih zvučnika	31
11. Uticaj ultrazvuka na ljudsko tijelo	32
12. Zaključak	33
Literatura	34
Lista slika.....	35
Lista tabela.....	36
Lista skraćenica.....	36

1. Uvod

Predmet završnog rada je dizajniranje ultrazvučnog usmjerenog zvučnika. Ultrazvučni usmjereni zvučnik je zvučnik sa izuzetno usmjereno polarnom karakteristikom. Usmjereni zvučnici generiraju uzak snop zvučnog signala koji se može čuti samo neposredno ispred zvučnika.

U okviru završnog rada će biti teoretski analiziran, dizajniran, izrađen i testiran ultrazvučni usmjereni zvučnik.

Naizmjenična fizička kompresija i ekspanzija medija sa određenom frekvencijom predstavlja zvučni talas. Sadržaj medija oscilira u smjeru propagacije talasa, pa se zbog toga ovi talasi nazivaju longitudinalnim mehaničkim talasima.

Talasi čija je frekvencija manja od 20 [Hz] se nazivaju infratalasima, a talasi frekvencija iznad 20 [kHz] ultrazvučnim talasima. Ljudsko uho može detektovati frekvencije koje se nalaze u opsegu između 20 [Hz] i 20 [kHz] [1].

Za izradu ultrazvučnog usmjerenog zvučnika će biti korišten niz ultrazvučnih piezoelektričnih pretvarača koji se mogu koristiti kao primopredajni uređaji.

Rad je strukturiran na sljedeći način. U uvodnom poglavlju su opisani osnovni pojmovi vezani za zvučni talas, kao i definicije infratalasa i ultrazvučnih talasa.

U drugom poglavlju je dat kratak uvod u signale i sisteme. Definiran je signal, te je izvršena podjela signala.

U trećem poglavlju su obrađeni zvučnici. Obzirom da je predmet ovog rada dizajniranje ultrazvučnog usmjerenog zvučnika, napravljen je kratak osvrt na klasične zvučnike, njihove karakteristike, te dijagram zračenja. Pored klasičnih zvučnika su analizirani i usmjereni zvučnici, te načini kako ih je moguće realizovati. Također, opisane su bliska i daleka zona zračenja zvučnika.

Četvrto poglavlje analizira senzore i pretvarače. Ukratko je ukazano na nekoliko faktora koji utiču na izbor pretvarača. Objasnjen je piezoelektrični efekat. Također, analizirani su i piezoelektrični i ultrazvučni pretvarači.

U petom poglavlju su analizirane modulacije koje se mogu koristiti za ultrazvučni usmjereni zvučnik, a objašnjeno je i na šta treba obratiti pažnju prilikom izbora frekvencije nosioca.

Šesto, sedmo i osmo poglavlje sadrže sheme koje su korištene tokom izrade ultrazvučnog usmjerenog zvučnika.

U devetom poglavlju je opisana demodulacija ultrazvučnog signala.

U desetom poglavlju su nabrojane neke od primjena ultrazvučnih usmjerih zvučnika. Jedanaesto poglavlje se bavi uticajem ultrazvučnih talasa na ljudsko tijelo.

2. Uvod u signale

2.1. Signali i sistemi

Signal predstavlja fizičku veličinu koja ovisi o vremenu, prostornim koordinatama ili nekim drugim nezavisnim promjenljivim. Informacija je sadržana u promjenama signala. Dakle, bez promjene signala ne postoji ni informacija. Primjeri prirodnih signala koji nose neku informaciju su: ljudski govor, glasovi životinja, svjetlost itd. Također, električno polje i električno opterećenje predstavljaju prirodne signale [2].

Svaki signal se definiše kao funkcija jedne (1-D) ili više nezavisno promjenljivih (M-D) koje nose informacije o fizikalnom fenomenu. Primjer jednodimenzionalnog signala je govorni signal, a primjer dvodimenzionalnog, tj. višedimenzionalnog signala je signal slike [2].

Signali mogu biti obrađeni pomoću sistema koji ih mogu modifikovati ili izvući određene informacije iz njih. Dakle, sistem je moguće posmatrati kao skup sklopova koji procesiraju skup signala, koji predstavljaju ulazne podatke u sistem, da bi se dobio drugi skup signala koji predstavljaju izlaz iz sistema [3].

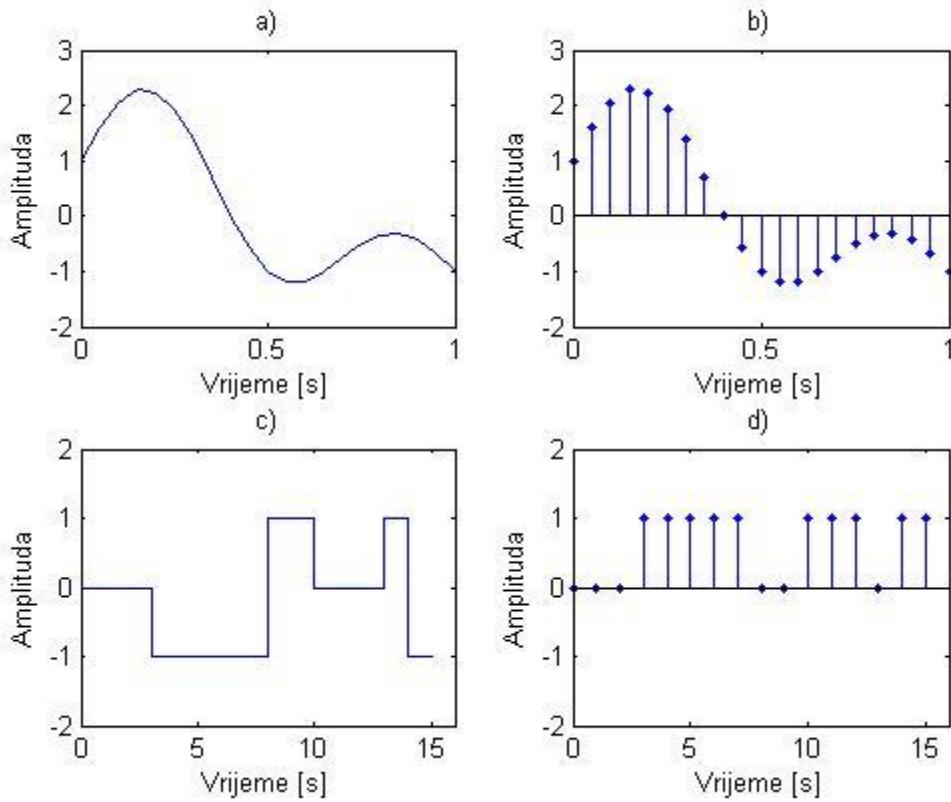
2.2. Podjela signala

Prije analiziranja i dizajniranja ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika, potrebno je napraviti kratak osvrt na signale i njihovu podjelu. Kao što je već rečeno, informacije je sadržana u promjenama signala. Prema tome, signali kojima je fizički opis poznat u svakom trenutku, bilo analitički ili grafički, nazivaju se *determinističkim signalima*. Kako se deterministički signali potpuno mogu opisati matematskim relacijama, to oni ne nose nikakvu informaciju, tj. kod ovakvih signala ne postoji neizvjesnost. Determinističke signale je dalje moguće podijeliti na *periodične i aperiodične signale* [2].

Za signal kažemo da je *slučajan* ako je on poznat samo u domenu vjerovatnog opisa, odnosno kada se umjesto njegovog analitičkog ili grafičkog prikaza pojavljuje funkcija vjerovatnoće, kao što su srednja vrijednost, srednje kvadratna vrijednost, varijansa, kumulativna funkcija raspodjele itd. Stoga, buduća vrijednost signala se ne može predvidjeti. Prema tome, informaciju nose samo slučajni signali [2].

Također, moguće je napraviti i podjelu signala prema njihovom ponašanju u vremenu. Tako postoje *vremenski kontinualni signali* i *vremenski diskretni signali*. Vremenski kontinualni signali su definirani u svakom vremenskom trenutku u određenom vremenskom intervalu. Signali koji su definirani samo u određenim vremenskim trenucima se nazivaju vremenski diskretnim signalima.

Analogni signali su signali čija amplituda može imati bilo koju vrijednost iz nekog kontinualnog opsega i definira je u svakom trenutku. *Digitalni signali* predstavljaju signale kod kojih su i amplituda i vrijeme diskrete veličine.



Slika 2.1. Graficka interpretacija signala: a) analogni signal, b) diskretni signal, c) kvantizirani signal, d) digitalni signal.

Analogni signal	I vrijeme i amplituda kontinualni
Diskretni signal	Vrijeme diskretno, a amplituda kontinualna
Kvantizirani signal	Vrijeme kontinualno, a amplituda diskretna
Digitalni signal	I vrijeme i amplituda diskretni

Tabela 2.1. Analogni i digitalni signali (tabela preuzeta iz [2]).

Za izradu sklopa će biti korištena širinsko impulsna modulacija koja će biti obrađena u petom poglavlju. Kako širinsko impulsna modulacija vrši konverziju analognog signala u digitalni, a moguća je i obrnuta pretvorba, ove definicije analognih i digitalnih signala su bitne.

3. Zvučnici

Zvučnik je elektromehanički pretvarač koji služi za konverziju električnog signala u zvučni talas određene frekvencije iz opsega frekvencija (20-20000) [Hz], tj. frekvencije koje ljudsko uho može detektovati [4].

3.1. Klasični zvučnici

Princip rada zvučnika se zasniva na pretvaranju električne energije u mehaničku. Električna energija se u mehaničku obično pretvara elektrodinamičkim, elektromagnetskim ili elektrostatskim putem.

Osnovne karakteristike zvučnika su:

- nazivna snaga P_n koja se definiše kao najveća snaga kojom se zvučnik može opteretiti pri kojoj zvučnik ispravno radi,
- impedansa zvučnika Z_n koja je ovisna o frekvenciji zvučnog talasa,
- frekvencijska karakteristika zvučnika koja pokazuje ovisnost zvučnog pritiska o frekvenciji,
- efikasnost zvučnika,
- korisnost zvučnika koja se definira kao odnos emitovane akustičke snage i uložene električne snage,
- dijagram zračenja.

Prema načinu pretvorbe energije, zvučnici se mogu podijeliti na zvučnike sa elektro-mehaničko-akustičkom pretvorbom i na zvučnike sa elektro-akustičkom pretvorbom. Zvučnici sa elektromehaničko-akustičkom pretvorbom koriste element (površinu) koja putem vibracija generiše mehanički talas. Taj element se najčešće naziva membrana. Ovi zvučnici emituju zvuk direktno u medij kroz koji se on prostire. Također, postoje zvučnici kod kojih je između membrane i medija postavljen tzv. rog. Zvučnici u obliku roga se koriste u sistemima gdje je potrebna visoka očuvanost zvuka kao što su dvorane, pozorišta i slično [4].

Osnovne prednosti zvučnika koji emituju zvuk direktno u medij su male dimenzije, niske cijene i zadovoljavajući odziv na širokom frekvencijskom opsegu. Najveći nedostatak ovih zvučnika je mala efikasnost [4].

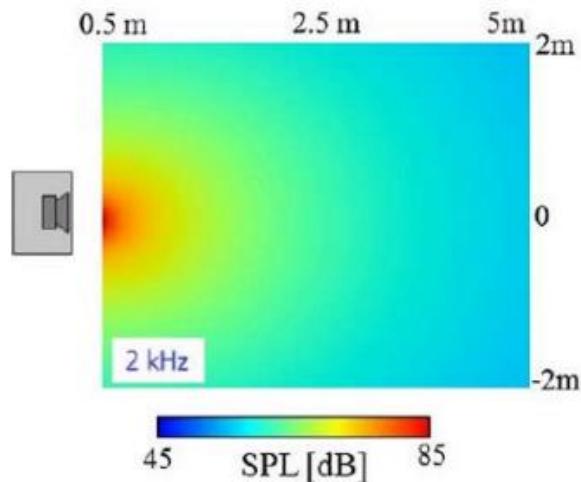
Poznato je da usmjerenost talasa zavisi od dimenzija izvora zvuka i od talasne dužine zvučnog talasa. Usmjerenost talasa će biti veća što je zvučnik veći. Također, zvučnici koji emituju talas visoke frekvencije, tj. male talasne dužine će imati veću usmjerenost od zvučnika koji emituju zvuk niske frekvencije odnosno velike talasne dužine.

Talasna dužina je obrnuto proporcionalna frekvenciji, a veza između njih je određena sa:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (3.1)$$

gdje je λ [m] talasna dužina izražena u metrima, v [$\frac{m}{s}$] brzina izražena u metrima u sekundi i f [Hz] frekvencija izražena u Hertz-ima [5].

Klasični zvučnici emituju signal frekvencije iz intervala (20-20000) [Hz] što znači da je usmjerenost mala. Dakle, bez obzira gdje se slušalac nalazi, on će čuti emitovani zvuk. Dijagram zračenja ovakvih zvučnika je prikazan na slici 3.1.



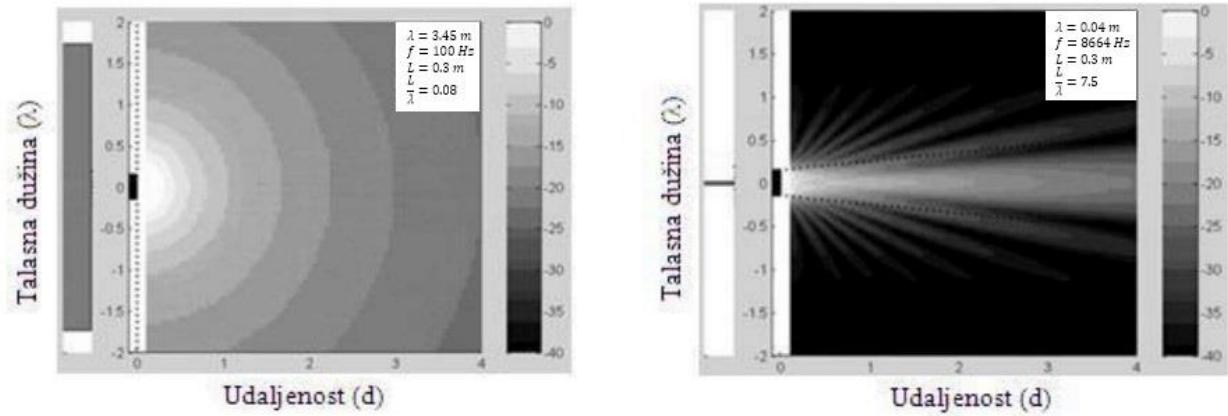
Slika 3.1. Dijagram zračenja klasičnih zvučnika (slika preuzeta iz [6]).

3.2. Usmjereni zvučnici

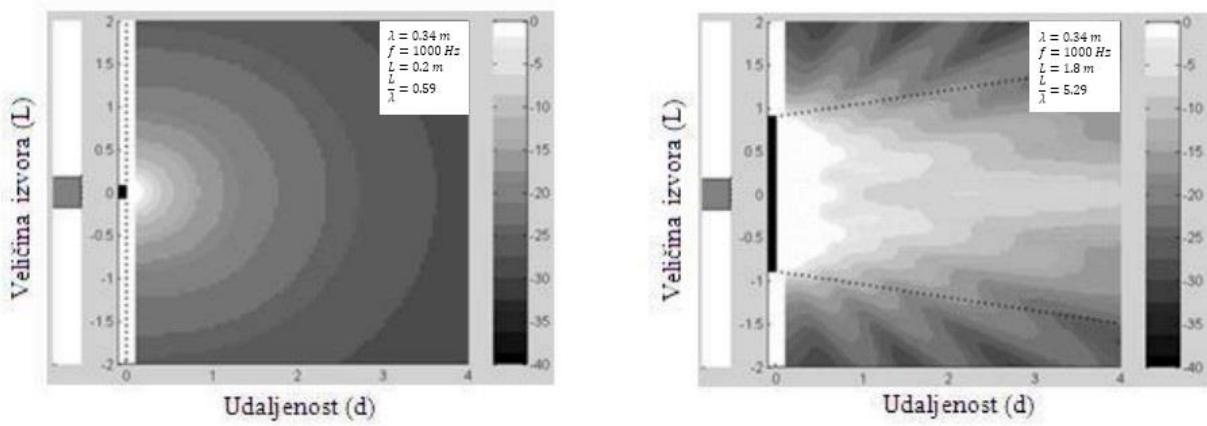
Klasični zvučnici su dobri u slučaju kada je poželjno ozvučiti čitavu prostoriju, odnosno kada se želi postići da sve osobe čuju zvuk kojeg emituju ti zvučnici. Međutim, postoje situacije u kojima se želi postići da određena skupina ljudi ili pojedinci čuju zvuk, a da ostali ne budu ometani. U tu svrhu je potrebno koristiti usmjereni zvučnike.

Usmjereni zvučnici emituju zvučne talase u vidu veoma usmjerenog uskog snopa što znači da će slušalac čuti zvuk samo ako se nalazi unutar tog snopa. Ova osobina pruža mogućnost pozicioniranja signala na željeno mjesto, tj. moguće je ozvučiti željeni dio prostorije.

Kao što je već rečeno, usmjerenost generisanog snopa talasa ovisi o dimenzijama zvučnika i talasnoj dužini emitovanog talasa. Na slikama 3.2. i 3.3. je prikazano kako promjena veličine izvora i talasne dužine zvuka utiče na usmjerenost talasa.



Slika 3.2. Grafički prikaz ovisnosti usmjerenosti snopa i talasne dužine.

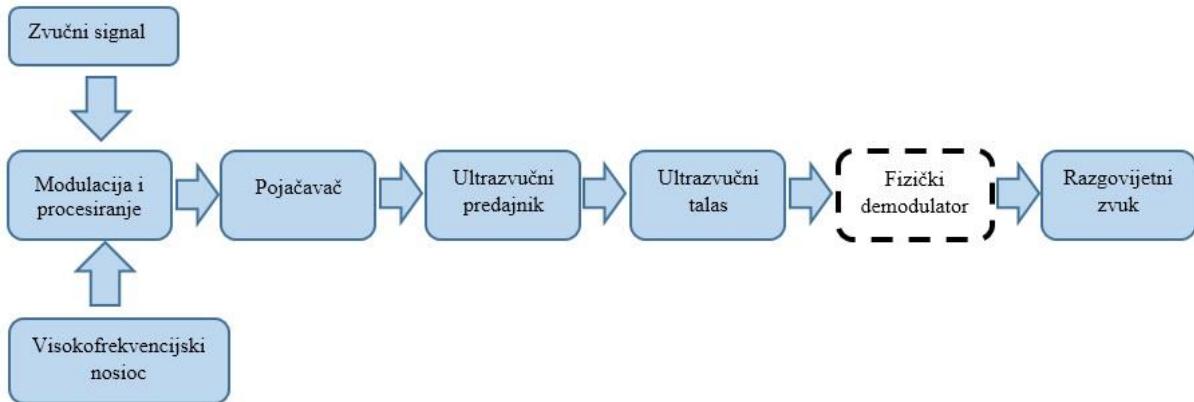


Slika 3.3. Grafički prikaz ovisnosti usmjerenosti snopa i veličine izvora

Dakle, jedan način za realizaciju usmjerenog zvučnika je korištenje zvučnika veoma velikih dimenzija. Nedostatak ovog rješenja je robusnost takvog zvučnika jer bi zauzimao previše prostora.

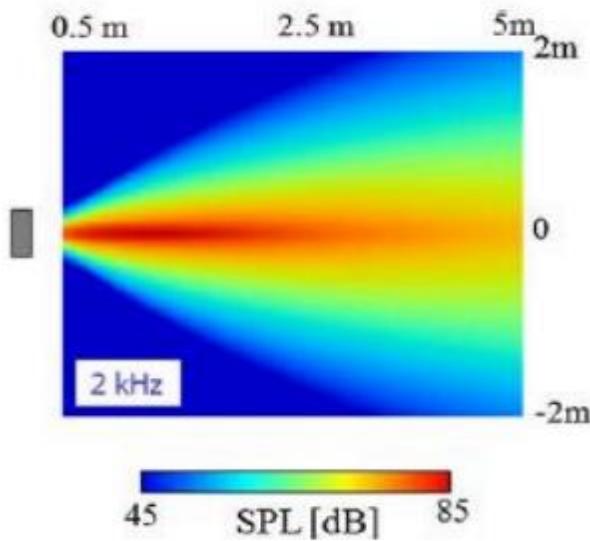
Drugi način se zasniva na korištenju niza zvučnika. Korištenjem niza zvučnika, usmjerenost se kontroliše pomoću faza zvučnika u nizu. Pomoću digitalnih tehnika procesiranja, niz zvučnika postiže nužnu fleksibilnost u podešavanju i prilagođavanju dijagrama zračenja. Glavni nedostatak ove metode je što zahtijeva fizički veći niz, reda nekoliko metara, da bi ostvario visoku usmjerenost pri emitovanju talasa frekvencije koju ljudsko uho može detektovati [7].

Treći način za postizanje visoke usmjerenosti je korištenje tzv. parametrijskog niza (eng. *Parametric Array – PA*). PA moduliše razgovijetni zvučni signal na noseću frekvenciju koja pripada ultrazvučnom opsegu frekvencija, a zatim tako modulisani signal pojačava i pomoću ultrazvučnog predajnika emituje u medij.



Slika 3.4. Blok dijagram generisanja ultrazvučnog talasa.

Na slici 3.5. je prikazan dijagram zračenja PA.

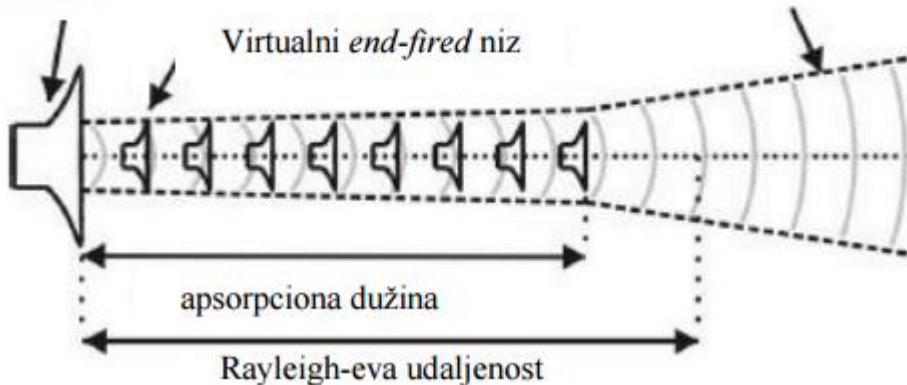


Slika 3.5. Dijagram zračenja PA (slika preuzeta iz [6]).

3.3. Bliska i daleka zona zračenja

Korištenje PA za generisanje usmjerenog snopa zračenja zahtijeva uvođenje dvije važne veličine vezane za PA, a to su *Rayleigh-eva udaljenost* i *apsorpciona dužina*.

Izvor zvuka



Slika 3.6. Shema PA (slika preuzeta iz [8]).

Rayleigh-eva udaljenost se definiše kao udaljenost od niza na kojoj nastaje prelaz iz bliske zone zračenja u daleku zonu zračenja. Unutar Rayleigh-eve udaljenosti postoji planarni ultrazvučni talas kojeg ljudsko uho ne može detektovati. Nakon Rayleigh-eve udaljenosti talas postaje sve više sferni talas i sve brže slabi.

Apsorpciona dužina se definiše kao udaljenost nakon koje prestaju djelovati nelinearnosti medija kroz koji se ultrazvučni talas prostire. Ova dužina se također naziva i efektivna dužina niza. Prema tome, na udaljenosti većoj od apsorpcione dužine, ultrazvučni talas je dovoljno oslabio tako da je dobijen razgovijetni zvučni talas, tj. talas čija je frekvencija ispod gornje granice čujnosti čovjeka [7].

Dakle, u bliskoj zoni zračenja se prostire ultrazvučni talas kojeg čovjek ne može detektovati, dok se u dalekoj zoni zračenja pojavljuje razgovijetni zvučni talas.

Način na koji dolazi do pojave razgovijetnog zvučnog talasa je ustvari posljedica nelinearnosti medija kroz koji se talas prostire. U devetom poglavlju će biti detaljnije objašnjen način nastanka razgovijetnog zvuka.

4. Senzori i pretvarači

Kako bi se napravio PA, ultrazvučna energija mora biti emitovana u medij. U tu svrhu se koriste ultrazvučni pretvarači [9].

U uvodnom dijelu je rečeno da će za izradu sklopa biti korišteni ultrazvučni pretvarači. Na ovom mjestu bi trebalo uvesti razliku između pretvarača i senzora.

Senzor vrši konverziju bilo koje energije u neki drugi tip energije, dok pretvarači pretvaraju bilo koji tip energije u električnu energiju. Međutim, senzori se mogu koristiti kao dio pretvarača [1].

4.1. Kriteriji za izbor pretvarača

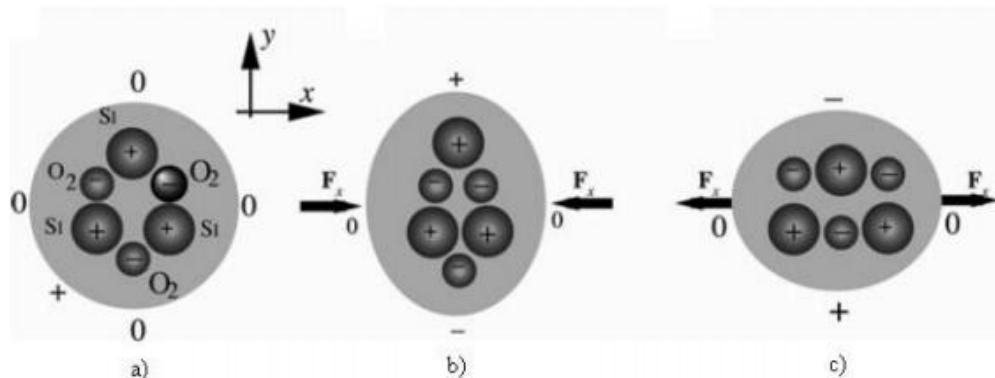
Postoji mnoštvo kriterija za izbor pretvarača od kojih će u ovom radu biti nabrojani samo neki. Ono o čemu treba voditi računa pri izboru pretvarača je sljedeće:

- da li su podaci u sistemu u kojem se koristi pretvarač analogni ili digitalni,
- kakve su prirode glavni elementi u tom sistemu,
- da li se koristi kondicioniranje signala, multipleksiranje, analogno-digitalna konverzija i slično,
- da li se vrši procesiranje i skladištenje podataka,
- da li je potrebno izvršiti filtriranje izlaznog signala iz pretvarača itd.

4.2. Piezoelektrični efekat

Piezoelektrični efekat predstavlja generisanje električnog naboja djelovanjem sile na materijale kao što su kristali kvarca, polimeri itd. Piezoelektrični kristali direktno pretvaraju mehanički pritisak u električni nابoj. Najčešće korišteni materijal za pretvarače je piezoelektrična keramika koja može raditi na vrlo visokim frekvencijama. Iz tog razloga se piezoelektrični pretvarači koriste za emitovanje ultrazvučnih talasa [1].

Piezoelektrični efekat je najjednostavnije objasniti pomoću kristala kvarca.



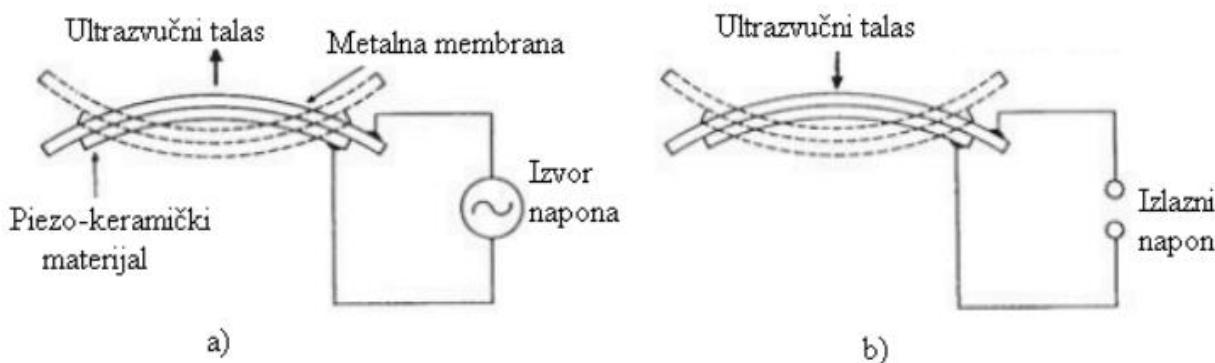
Slika 4.1. Piezoelektrični efekat u kristalu kvarca (slika preuzeta iz [1]).

Sa slike 4.1. a) se može zaključiti da prije djelovanja bilo kakve sile u čeliji kristala kvarca vlada ravnotežno stanje, tj. kristal kvarca je električki neutralan. Kada vanjska sila F_x djeluje duž x -ose (slučajevi b) i c)), tada dolazi do deformacije čelija kristala kvarca pri čemu se atomi u kristalu tako raspoređuju da je na jednoj strani pozitivan, a na drugoj strani negativan naboј. Dakle, djelovanjem sile na kristal kvarca pojavljuje se razlika potencijala na njegovim krajevima. Piezoelektrični efekat je fizikalno reverzibilan fenomen. To znači da priključenjem vanjskog napona, tj. dovođenjem razlike potencijala na krajeve kristala kvarca, dolazi do mehaničkog istezanja kristala [1].

4.3. Piezoelektrični i ultrazvučni pretvarači

Piezoelektrični pretvarači stvaraju napon na svojim krajevima kada na njih djeluje vanjska sila. Često se koriste kao ultrazvučni prijemnici i predajnici, kao dijelova uređaja za mjerjenje ubrzanja, sile i pritiska. U ultrazvučnim predajnicima, sinusoidalne varijacije amplitude električnog signala dovedene na ultrazvučni pretvarač imaju za posljedicu mehaničko istezanje kristala kvarca, što dovodi do generisanja talasa, tj. električna energija se pretvara u mehaničku koja se u vidu talasa prostire kroz medij [5].

Na slici 4.2. je prikazan prethodni slučaj, kao i slučaj kada se pretvarač koristi kao prijemnik.



Slika 4.2. Piezoelektrični ultrazvučni pretvarač: a) na predajnoj strani i b) na prijemnoj strani (slika preuzeta iz [1]).



Slika 4.3. Ultrazvučni pretvarač.

5. Modulacione sheme

U trećem poglavlju je objašnjeno na koji način je moguće ostvariti usmijeren snop zračenja zvučnog talasa. U ovom radu će biti korišten PA, odnosno niz ultrazvučnih pretvarača čiji se rad zasniva na piezoelektričnom efektu, koji će emitovati talase frekvencija iz opsega ultrazvuka. Da bi signal iz osnovnog opsega frekvencija translirali u opseg visokih frekvencija, potrebno je izvršiti modulaciju signala. U ovom poglavlju će biti obrađene modulacije koje su karakteristične za PA, a to su:

- dvostrana amplitudna modulacija (eng. *Double Side Band Amplitude Modulation – DSB AM*),
- *square-root* amplitudna modulacija (*SR AM*),
- jednostrana amplitudna modulacija (eng. *Single Side Band Amplitude Modulation – SSB AM*),
- širinsko impulsna modulacija (eng. *Pulse Wave Modulation – PWM*).

Prije nego što budu analizirane navedene modulacione sheme, bit će napravljen kratak osvrt na prvi način generisanja usmijerenog zvučnog talasa bez modulacije. On se zasniva na korištenju dva izvora signala visokih frekvencija koje se razlikuju za iznos koji ljudsko uho može detektovati.



Slika 5.1. Nelinearna interakcija signala u mediju.

Dva izvora signala su smještena paralelno jedan pored drugog, emitujući zvučne talase frekvencija f_1 i f_2 . Kao rezultat nelinearnosti medija, osim emitovanih frekvencija se pojavljuju i njihov zbir i njihova razlika, kao i ostale frekvencije od kojih je značajna samo njihova razlika jer su frekvencije izabrane tako da se razlikuju za vrijednost koju čovjek može detektovati. Ostale komponente koje se pojavljuju nisu od interesa jer su na frekvencijama koje ljudsko uho ne može detektovati.

Berkay¹ je napravio generalnu analizu, ne ograničavajući se samo na dva izvora signala. Berkay je pretpostavio da primarni talas ima oblik:

¹ H. O. Berkay (1926-2016) – turski profesor i inženjer, *Possible Exploitation of Non-Linear Acoustics in Underwater Transmitting Applications*, Journal of Sound and Vibration, Volume 2, Issue 4, Oktobar 1965, str. 435-461

$$P_1(t) = P_1 E(t) \sin(\omega_c t), \quad (5.1)$$

gdje je P_1 amplituda primarnog talasa, $E(t)$ anvelopa, a $\omega_c = 2\pi f_c$, pri čemu je f_c frekvencija nosioca. Polazeći od ove pretpostavke, Berkay je pokazao da sekundarni, odnosno demodulisani signal ovisi o anvelopi modulisanog signala, tj. da je demodulisani signal PA proporcionalan drugom izvodu kvadrata anvelope po vremenu:

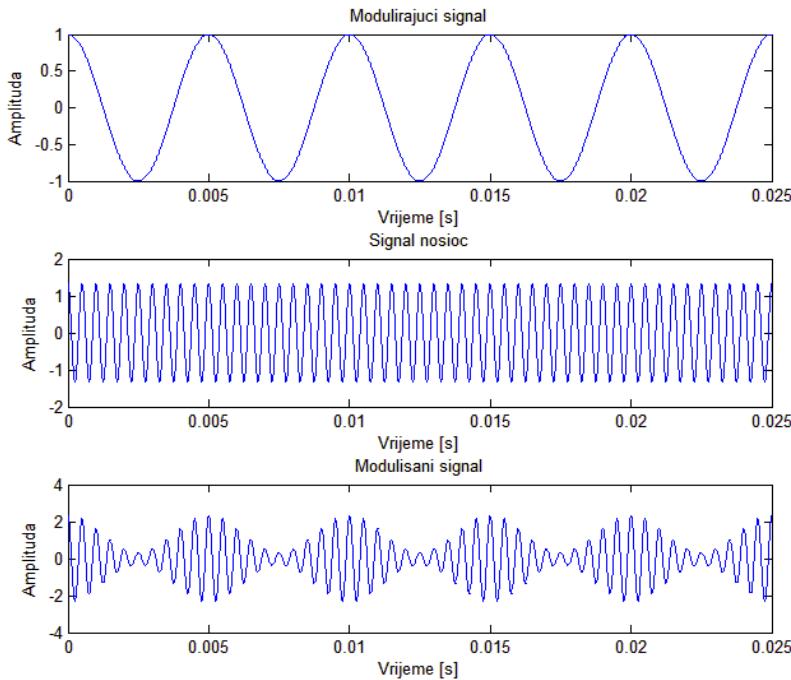
$$p_2(t) \sim k P_1^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t), \quad (5.2)$$

gdje je $p_2(t)$ demodulisani signal, a k faktor koji zavisi od prečnika izvora a , koeficijenta nelinearnosti β , gustine medija kroz koju se talas prostire ρ_0 , brzine talasa c_0 , udaljenosti od izvora r i faktora prigušenja α . Ovo je tzv. „Berkay-evo rješenje za daleku zonu zračenja“ jer on pretpostavlja da se nalazi dovoljno daleko od izvora gdje ne postoji ultrazvuk, tj. primarni talas. Pokazano je da je ovo rješenje valjano i za blisku zonu zračenja, ali tada osim demodulisanih signala postoji i primarni talas, tj. ultrazvuk [9].

PA ne koriste modulacije sa potisnutim nosiocem jer se potiskivanjem nosioca unosi dodatna nelinearnost u sistem [9].

Već je rečeno da je za transliranje frekvencije potrebno izvršiti modulaciju signala. Za modulaciju signala je potreban signal koji će biti nosioc, a to je najčešće harmonijski signal (sinus ili kosinus).

Modulacija koju PA koriste je amplitudna modulacija koja predstavlja proces pri kojem se amplituda nosioca mijenja u skladu sa modulišućim (originalnim) signalom. To se ostvaruje množenjem originalnog signala sa nosiocem frekvencije f_c .



Slika 5.2. Grafička interpretacija amplitudno modulisanog signala.

5.1. Dvostrana amplitudna modulacija – DSB AM

Neka je $s(t)$ modulišući signal. Tada modulisani signal $s_m(t)$ ima oblik:

$$s_m(t) = A_m \cdot s(t) \cdot \cos(2\pi f_c t), \quad (5.3)$$

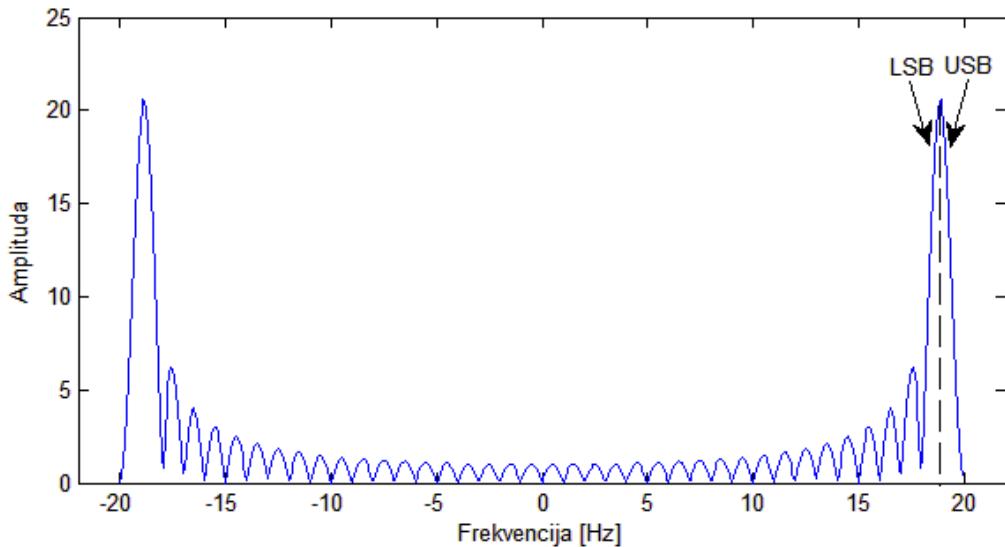
gdje je A_m amplituda modulisanog signala.

Spektar modulisanog signala, primjenom Fourierove transformacije, je:

$$S_m(f) = \frac{A_m}{2} [S(f + f_c) + S(f - f_c)], \quad (5.4)$$

gdje su $S_m(f)$ i $S(f)$ Fourierove transformacije modulisanog i modulišućeg signala, respektivno.

U spektru modulisanog signala se nalaze dva bočna opsega – niži bočni opseg (eng. *Lower Side Band – LSB*) i viši bočni opseg (eng. *Upper Side Band - USB*), kao što je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3. Amplitudni spektar signala modulisanog harmonijskom funkcijom.

Dakle, u spektru amplitudno modulisanog signala postoje viši i niži bočni opsezi, kao i nosioc, iz kojih nastaje razgovijetni zvuk kao posljedica nelinearne interakcije nosioca i svakog bočnog opsega [6].

Nakon primjene DSB AM modulacije, amplituda drugog harmonika je proporcionalna kvadratu indeksa modulacije² m , što se vidi iz relacije (5.5):

$$P_d = \frac{\beta P_1^2 a^2 m^2 \omega^2}{8\rho_0 c_0^4 \alpha r} \cos(2\omega t), \quad (5.5)$$

dok je amplituda demodulisanog signala linearno ovisna o kvadratu modulacije:

² Indeks modulacije m se definiše kao odnos amplituda modulisanog signala i signala nosioca.

$$P_s = -\frac{\beta P_1^2 a^2 m \omega^2}{8 \rho_0 c_0^4 \alpha r} \sin(\omega t). \quad (5.6)$$

To znači da je moguće smanjiti nivo distorzije smanjenjem indeksa modulacije. Međutim, cijena koja je plaćena smanjenjem distorzije je manja jačina demodulisanog signala, odnosno manja efikasnost PA [10].

Dakle, nedostatak DSB AM modulacije je niska efikasnost ukoliko se želi smanjiti distorzija, te širok frekvencijski opseg koji modulacija zahtijeva zbog dva bočna opsega.

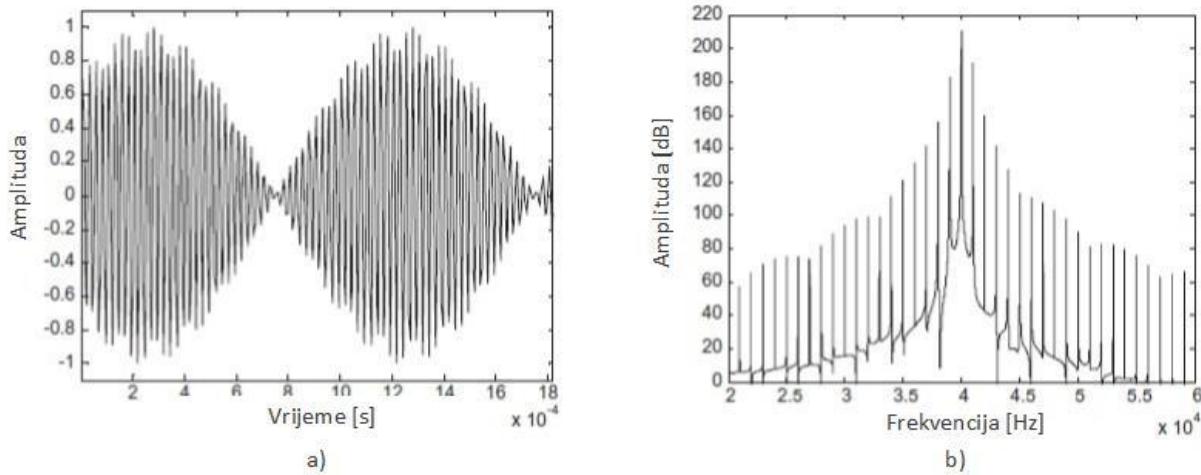
Modulacija koja omogućava upotrebu većeg indeksa modulacije uz malu distorziju je SR AM modulacija.

5.2. Square-root amplitudna modulacija – SR AM

Relacija (5.2) pokazuje da demodulisani signal ovisi o anvelopi modulisanog signala, i to od drugog izvoda kvadrata anvelope. Da bi se izbjegla distorzija nastala zbog toga, potrebno je izvršiti AM modulaciju dvostrukog integrala modulisanog signala. Ova tehnika predobrade je poznata kao SR AM modulacija [9].

SR AM modulacija obezbeđuje skoro identičnu anvelopu kao i DSB AM modulacija, kao i mogućnost upotrebe velikog indeksa modulacije što znatno povećava efikasnost PA. Nedostatak ove modulacije je taj što zahtijeva mnogo veći frekvencijski opseg od DSB AM modulacije [6].

Vremenski prikaz SR AM modulisanog signala, kao i frekvencijski spektar takvog signala su prikazani na slici 5.4.



Slika 5.4. Grafička interpretacija SR AM modulisanog signala: a) vremenski prikaz i b) frekvencijski spektar (slika preuzeta iz [6]).

Da bi se izbjegla velika širina frekvencijskog opsega koju zahtijevaju DSB AM i SR AM modulacije, došlo se na ideju da se koristi jednostrana amplitudna modulacija.

5.3. Jednostrana amplitudna modulacija – SSB AM

SSB AM modulacija podrazumijeva prenos samo jednog bočnog opsega, višeg ili nižeg. To znači da ova modulacija zahtijeva duplo manji frekvencijski opseg nego DSB AM.

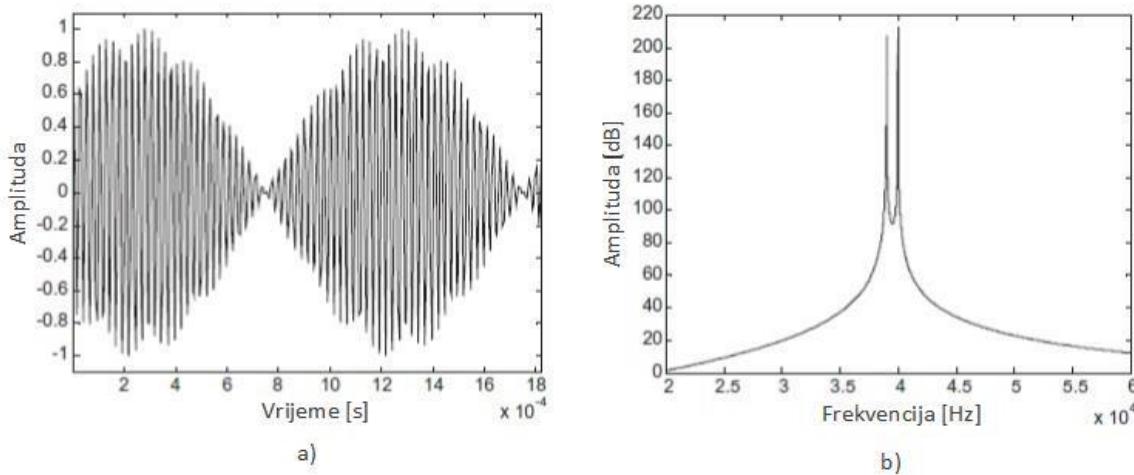
Kako demodulisani signal ovisi samo o anvelopi modulisanog signala, a pomoću SSB AM je moguće dobiti identičnu anvelopu kao i sa DSB AM, to je za generisanje usmjerenog zvučnog talasa moguće koristiti i SSB AM.

Kao što je već rečeno, korištenjem DSB AM modulacije medijem će se prostirati zvučni talas koji će imati frekvencijske komponente koje odgovaraju nosiocu i bočnim opsezima. Tokom prostiranja ovakvog talasa kroz medij, uslijed nelinearne interakcije nosioca i bočnih opsega, drugi harmonik će imati istu amplitudu kao i osnovni, što rezultuje velikom harmonijskom distorzijom.

S druge strane, primjenom SSB AM će signal, pored nosioca, imati samo jedan bočni opseg kao što je prikazano na slici 5.5. Prilikom prostiranja ovako modulisanog signala kroz medij kao što je zrak, dobit će se originalni signal uslijed nelinearne interakcije u mediju, a distorzija neće postojati jer ne postoje ostale frekvencije [9].

Dakle, PA koji koristi SSB modulaciju je superiornija u odnosu na PA koji koristi DSB modulaciju jer zahtijeva dvostruko manji frekvencijski opseg i nema distorzije za razliku od DSB kod koje je distorzija veoma izražena.

Korištenjem SSB modulacije moguće je izabrati koji opseg će biti korišten, niži (LSB) ili viši (USB). Generalno, sistemi koji koriste SSB modulaciju najčešće koriste viši bočni opseg. Međutim, PA koriste niži bočni opseg jer ima nekoliko prednosti. Prvo, korištenjem višeg bočnog opsega bi došlo do povećanog prigušenja ultrazvučnih talasa što bi smanjilo domet PA. Drugi razlog za korištenje nižeg bočnog opsega je taj što niže razgovijetne frekvencije modulisane visokim frekvencijama imaju veću usmjerenosnost [9].



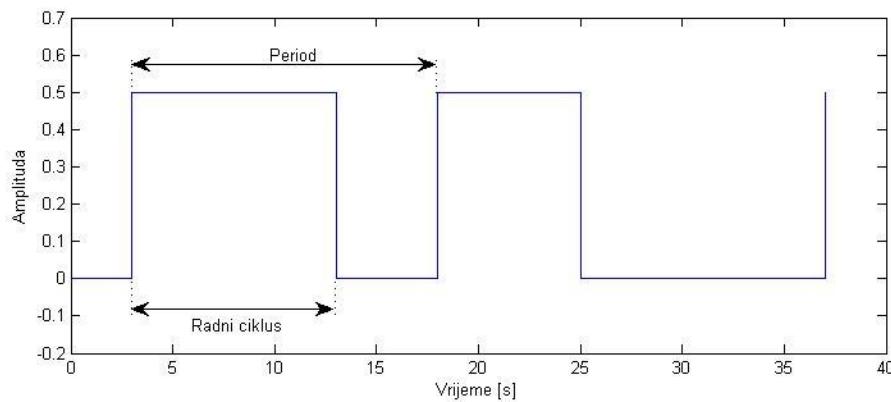
Slika 5.5. Grafička interpretacija SSB AM modulisanog signala: a) vremenski prikaz i b) frekvencijski spektar (slika preuzeta iz [6]).

5.4. Širinsko impulsna modulacija – PWM

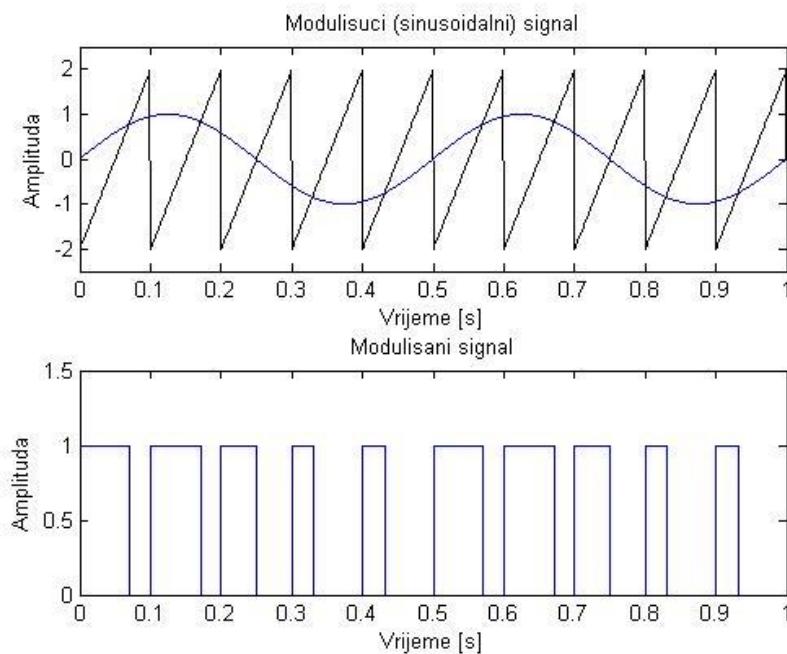
PWM modulacija informaciju o amplitudi analognog signala predstavlja širinom, odnosno trajanjem impulsa PWM signala. PWM signal je digitalni signal jer može uzeti jednu od dvije vrijednosti: logičku nulu ili logičku jedinicu.

PWM signal je pogodan za prenos jer informaciju o amplitudi nosi vrijeme, a ne amplituda što ga čini otpornijim na šum. Parametri PWM signala su:

- period T ,
- radni ciklus (eng. *Duty Cycle – D*), $0 \leq D \leq T$,
- amplituda signala.



Slika 5.6. Vremenski oblik PWM signala.



Slika 5.7. Grafička interpretacija PWM modulisanog signala.

Na slikama 5.6. i 5.7. su prikazani vremenski oblici PWM signala. Pilasti signal na slici 5.6. predstavlja signal za usporedbu sa modulišućim signalom (kada je modulišući signal veći od pilastog signala, tada PWM signal ima vrijednost jedan, u suprotnom ima vrijednost nula).

PWM modulacija je efikasna modulacija. PA baziran na PWM modulaciji generiše razgovijetni zvuk koji je slabiji od signala dobijenog putem DSB modulacije, ali je kvalitetniji. PWM modulator se može uporediti sa pojačavačem klase D bez niskopropusnog filtra [11]. Kako je PWM signal digitalne prirode, prelazak iz stanja logičke nule u stanje logičke jedinice i obrnuto se ne dešava trenutno. Kao posljedica toga se pojavljuje šum i povećana distorzija [6].

5.5. Izbor frekvencije nosioca za modulaciju signala

Izbor frekvencije nosioca je povezan sa efikasnošću pretvorbe snage signala. Efikasnost pretvorbe snage PA se definiše kao odnos snage demodulisanog (razgovijetnog) signala i snage primarnog talasa. Odnos snaga demodulisanog signala i primarnog talasa je određen relacijom:

$$\frac{W_s}{W_0} = \frac{\pi^2 \beta^2 f^2}{16 \rho_0 c_0^6 \alpha} \cdot \left(\frac{f_s}{f_0} \right)^2 W_0, \quad (5.7)$$

gdje su W_s i W_0 snage demodulisanog signala i primarnog talasa, f_s frekvencija demodulisanog signala, f_0 frekvencija primarnog talasa (nosioca) i f frekvencija originalnog signala [12].

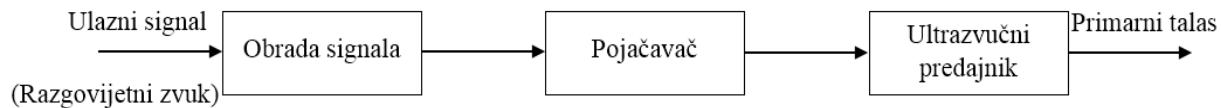
Iz relacije (5.7) se može zaključiti da bi frekvencija nosioca f_0 trebala biti što manja da bi se povećala pretvorba snage sistema. Nažalost, dokazano je da ultrazvučni talasi na nižim frekvencijama imaju veći uticaj na ljudsko tijelo nego na višim frekvencijama. S druge strane, smanjenjem frekvencije nosioca smanjila bi se i usmjereno zvučnog talasa [12].

Također, pri izboru frekvencije nosioca je potrebno voditi računa i o karakteristikama ultrazvučnih pretvarača. Naime, pokazano je da je mnogo teže proizvesti pretvarače sa širokim frekvencijskim opsegom na nižim frekvencijama nego na višim. Za dobru efikasnost, frekvenciju nosioca treba izabrati tako da bude što bliža rezonantnoj frekvenciji piezoelektričnog materijala od kojeg je napravljen ultrazvučni pretvarač. Za najbolje performanse je potrebno izabrati frekvenciju nosioca iz opsega frekvencija od 30 [kHz] do 70 [kHz] [1].

6. Izrada ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika

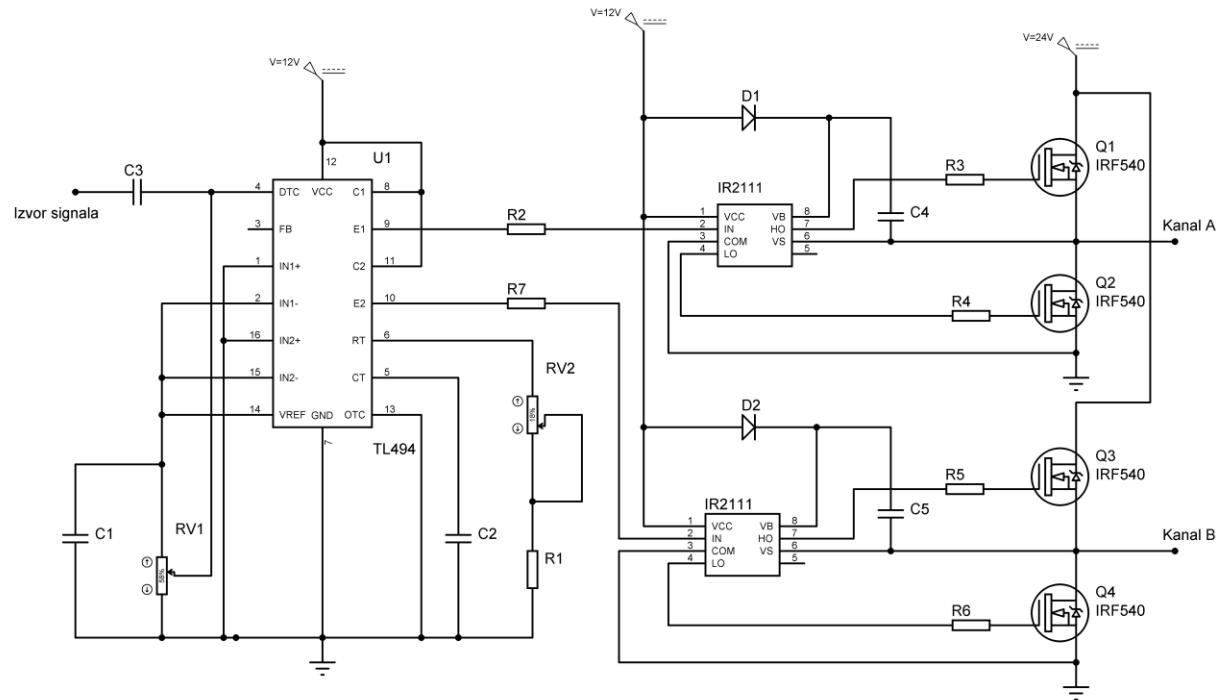
Parametrijski zvučnik se sastoji od tri osnovna dijela, kao što je prikazano na slici 6.1.:

- sklopa za obradu signala,
- pojačavača,
- ultrazvučnog predajnika.



Slika 6.1. Blok shema PA.

Shema koja je korištena za obradu i pojačanje signala tokom izrade ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika je prikazana na slici 6.2.

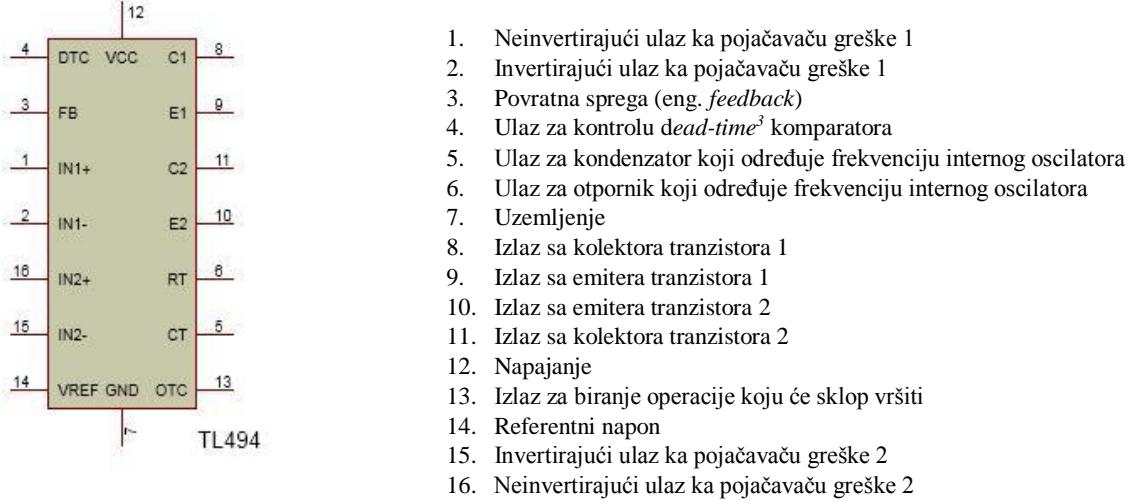


Slika 6.2. Shema obrade i pojačanja signala.

Sklop na slici 6.2. sadrži dva nezavisna kanala (A i B), pri čemu je na svaki od njih moguće priključiti niz od maksimalno 200 piezoelektričnih pretvarača [11].

6.1. Princip rada integralnog kola TL494

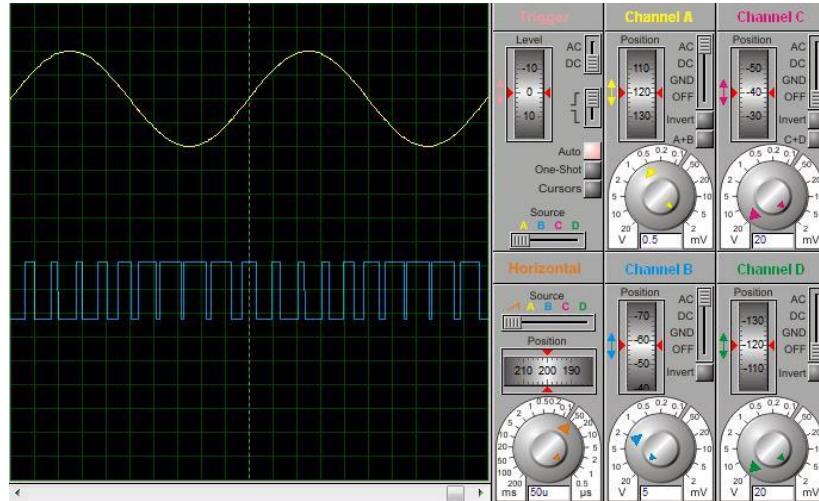
U radu je korišteno kolo TL494 za širinsko impulsnu modulaciju. Na slici 6.3. je prikazan raspored pinova za korišteno kolo.



Slika 6.3. Raspored pinova kola TL494 i njihova značenja (preuzeto iz [13]).

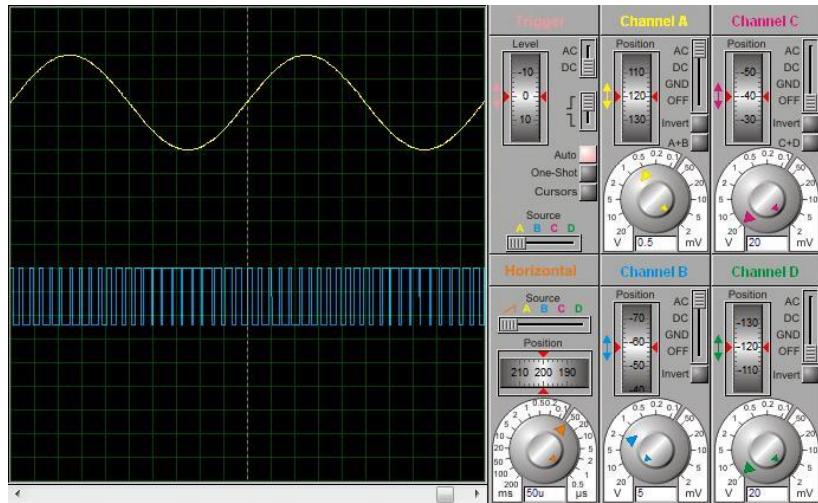
Frekvencija internog oscilatora je određena vrijednostima otpornika i kondenzatora spojenih na pinove RT i CT, tj. potenciometrom RV_2 i kondenzatorom C_2 , respektivno, dok je širina impulsa, odnosno radni ciklus određen potenciometrom RV_1 (slika 6.2.) [11]. Dakle, optimalnu modulaciju je potrebno podešiti potenciometrima RV_1 i RV_2 .

Na slikama 6.4. i 6.5. je prikazana promjena trajanja impulsa na izlazu kola TL494 uslijed promjene vrijednosti potenciometara RV_1 i RV_2 , pri čemu sinusoidalni signal predstavlja ulazni signal.



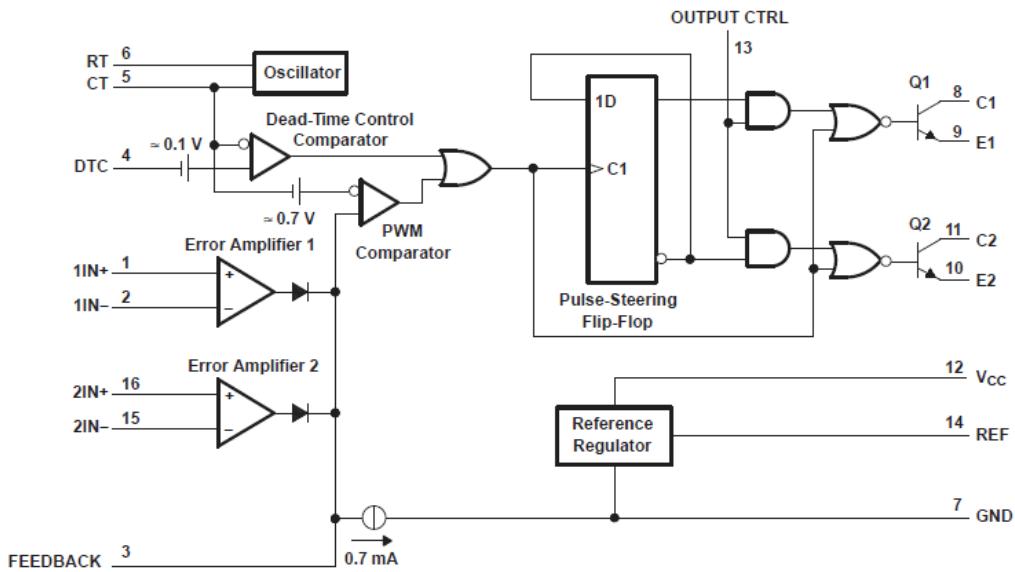
Slika 6.4. Ulagani i izlazni signali iz kola TL494.

³ Dead-time predstavlja vrijeme nakon svakog događaja tokom kojeg sistem nije u mogućnosti da zabilježi sljedeći događaj.



Slika 6.5 Ulagani i izlazni signali iz kola TL494 sa promijenjenim vrijednostima potenciometra.

Slika 6.6. predstavlja blok shemu integralnog kola TL494.

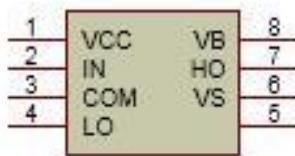


Slika 6.6. Elektronska shema integralnog kola TL494 (slika preuzeta iz [13]).

Integralno kolo TL494 vrši modulaciju signala tako što vrši poređenje pilastog signala, kojeg generiše interni oscilator, sa bilo kojim od dva kontrolna signala, pri čemu se kontrolni signali generišu iz dva izvora: dead-time kontrolnog kola i pojačavača greške. Izlaz iz komparatora će biti aktiviran tokom vremena kada je pilasti signal veći od kontrolnih signala. Porastom nivoa kontrolnog signala, vrijeme tokom kojeg je pilasti signal veći od kontrolnog signala opada, pa shodno tome se smanjuje i trajanje, tj. širina impulsa [13].

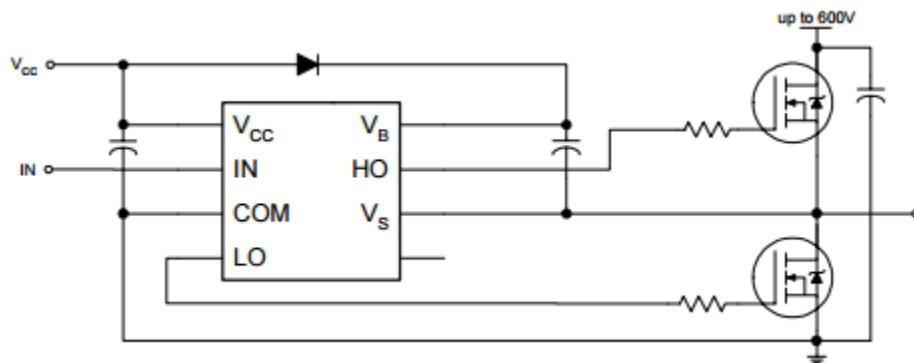
6.2 Opis integralnog kola IR2111

IR2111 predstavlja visokonaponski drajver za MOSFET i IGBT komponente sa međusobno zavisnim izlazima visokog (eng. *High Output – HO*) i niskog (eng. *Low Output – LO*) nivoa za polumosne (eng. *half-bridge*) aplikacije [14]. Na slikama 6.7. i 6.8. su prikazani rasporedi pinova kola IR2111, kao i najčešća shema njegovog spajanja.



1. Tačka višeg potencijala (napajanja) za LO izlaz
2. Logički ulaz za HO i LO izlaze, u fazi sa HO
3. Tačka nižeg potencijala za LO izlaz
4. Izlaz niskog nivoa – LO
5. Prazan pin
6. Tačka nižeg potencijala za HO izlaz
7. Izlaz visokog nivoa – HO
8. Tačka višeg potencijala (napajanja) za HO izlaz

Slika 6.7. Raspored pinova kola IR2111 i njihova značenja (preuzeto iz [14]).



Slika 6.8. Tipična shema spajanja integralnog kola IR2111 (slika preuzeta iz [14]).

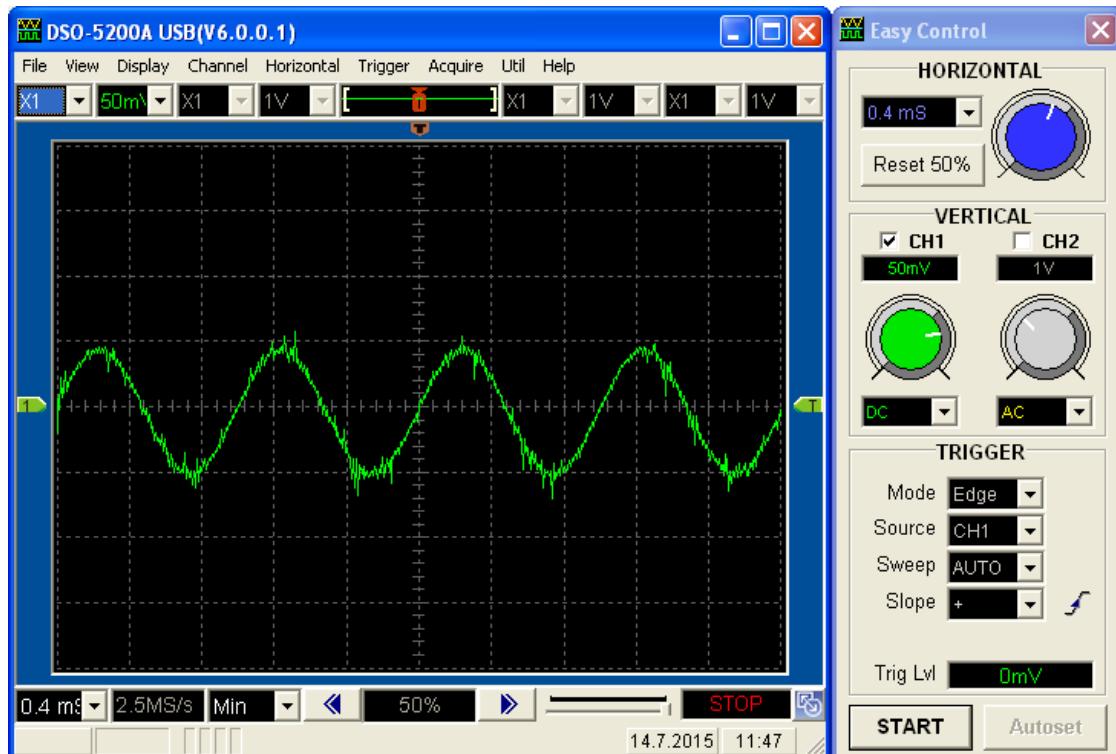
7. Simulacija ultrazvučnog usmjereno zvučnika na matadoru

Tokom testiranja ultrazvučnog usmjereno zvučnika je korištena sljedeća oprema:

- napojna jedinica,
- osciloskop,
- računar,
- spojni vodovi,
- komponente potrebne za realizaciju sheme sa slike 6.2.

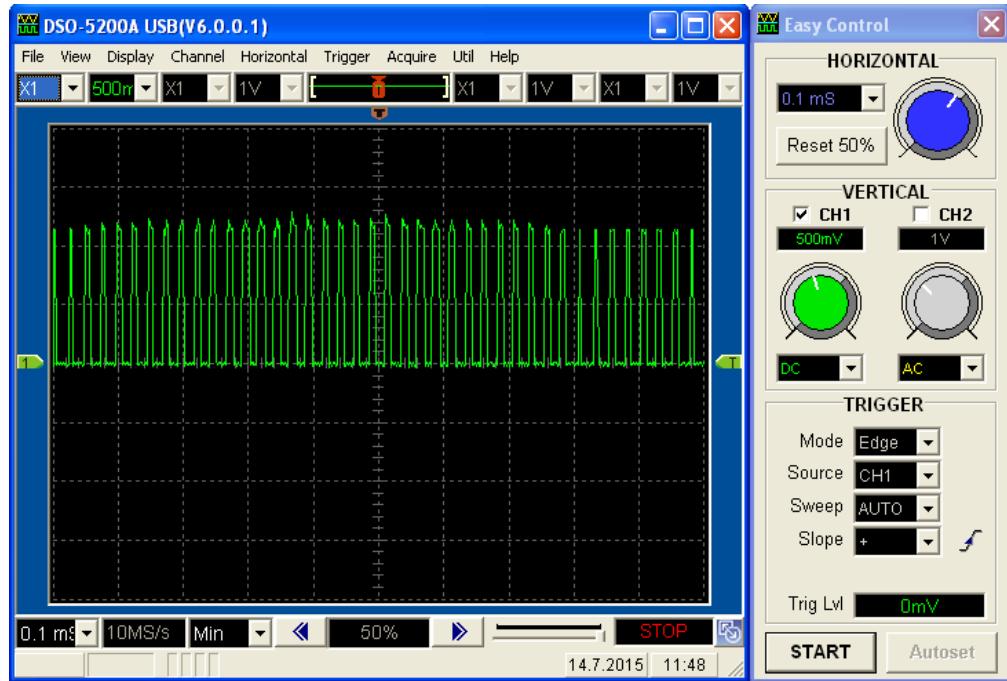
Kao ulazni signal je korišten zvučni signal doveden sa računara. Na slikama 7.1., 7.2. i 7.3. su prikazani ulazni signal u testirani sklop, signal na izlazu kola TL494 (signal na pinu 9 – E1) i signal na izlazu sklopa (kanal A).

Ulagni signal ima amplitudu 50 [mV] i frekvenciju 1 [kHz].



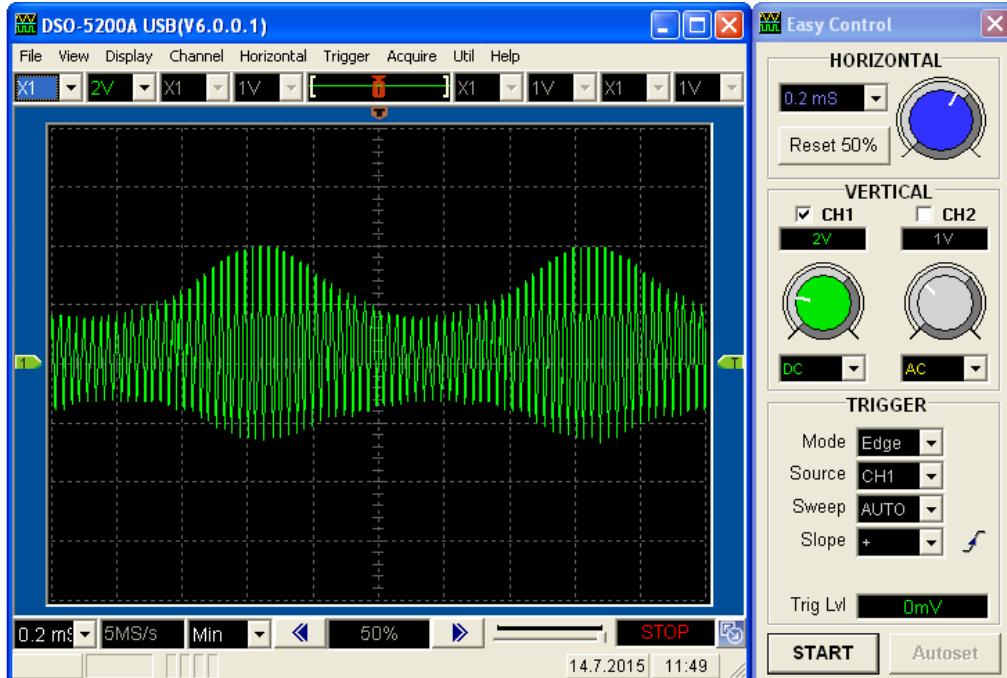
Slika 7.1. Ulagni signal doveden na pin 4 kola TL494.

Signal na izlazu kola TL494 je PWM signal amplitude 1.2 [V] i frekvencije 50 [kHz].



Slika 7.2. Signal na izlazu kola TL494 nakon PWM modulacije.

Izlazni signal, nakon prolaska kroz drajver i pojačanja MOSFET tranzistorima, je prikazan na slici 7.3. Može se primijetiti da anvelopa izlaznog signala prati ulazni signal. Amplituda izlaznog signala se mijenja u granicama od 1.6 [V] do 4 [V].



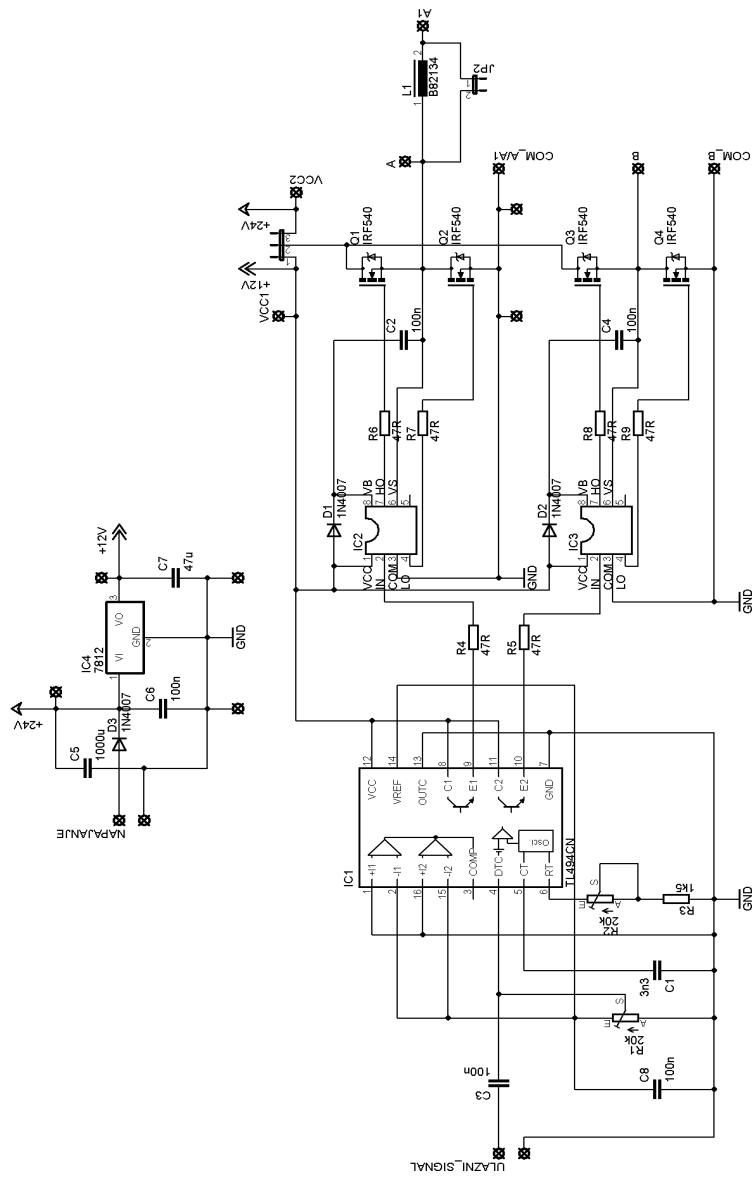
Slika 7.3. Signal na izlazu sklopa (kanal A).

Potrebno je napomenuti da su na slikama korištene različite razmjere na vremenskoj osi.

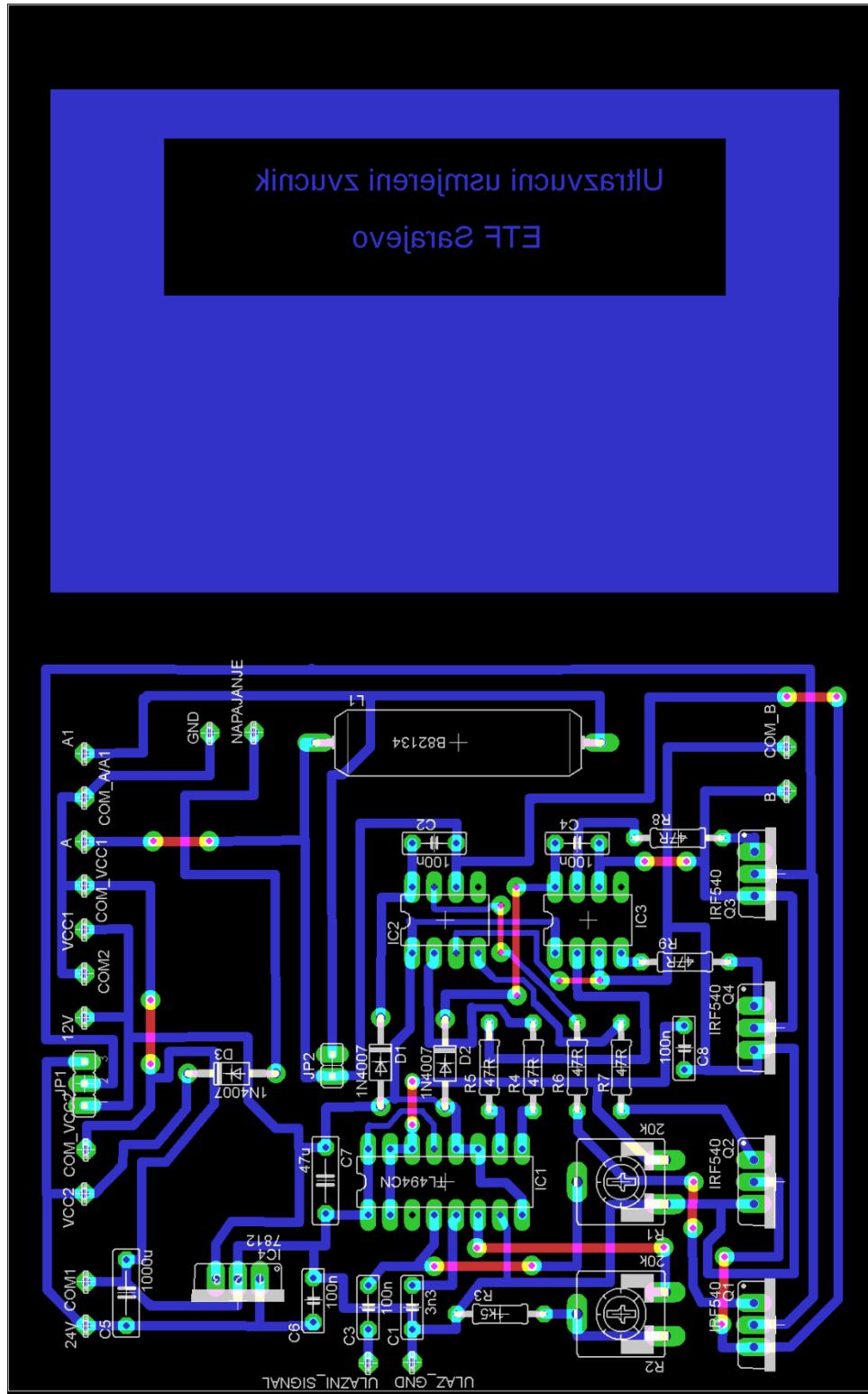
8. Izrada štampanih pločica

Za izradu štampanih pločica je korišten program Eagle 5.6.0.

Na slici 8.1. je prikazana shema korištena za izradu pločice za modulator i pojačavač. Osim modulatora i pojačavača, na pločici je predviđena i shema za regulator napona pomoću integralnog kola LM7812. U ovom radu je korišten samo jedan kanal (kanal A) za izradu ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika, ali na pločici su predviđena oba kanala ako bi se u budućnosti pojavila potreba za korištenjem i drugog kanala. Osim navedenih dijelova, na pločici se nalazi i zavojnica koja spaja ultrazvučne pretvarače sa kanalom A. Upotrebom zavojnice na navedenom mjestu se dobija jači zvuk koji je ujedno i više razgovijetan od zvuka dobijenog bez korištenja zavojnice.

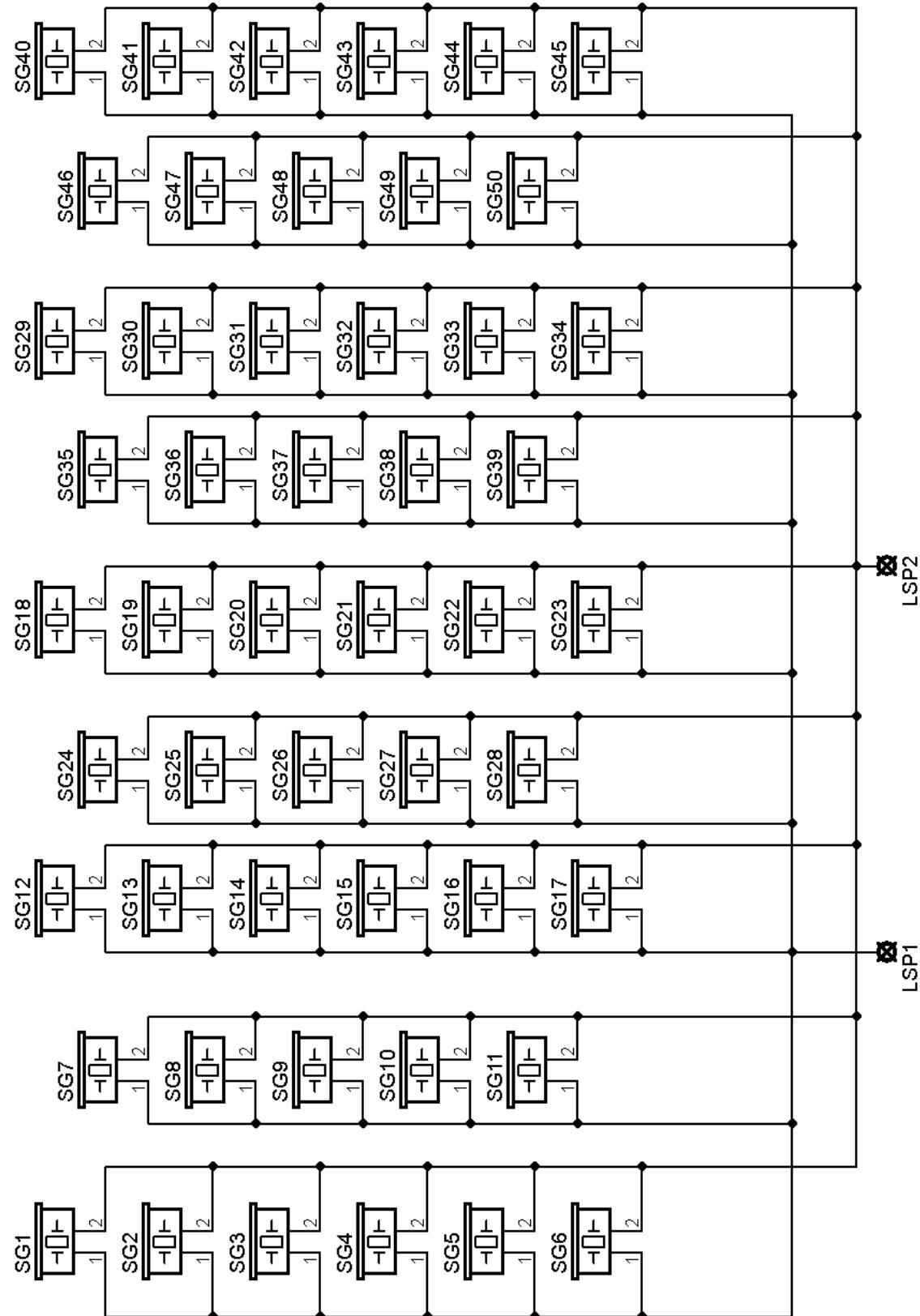


Slika 8.1. Shema modulatora, pojačavača i regulatora napona korištena za izradu sklopa.

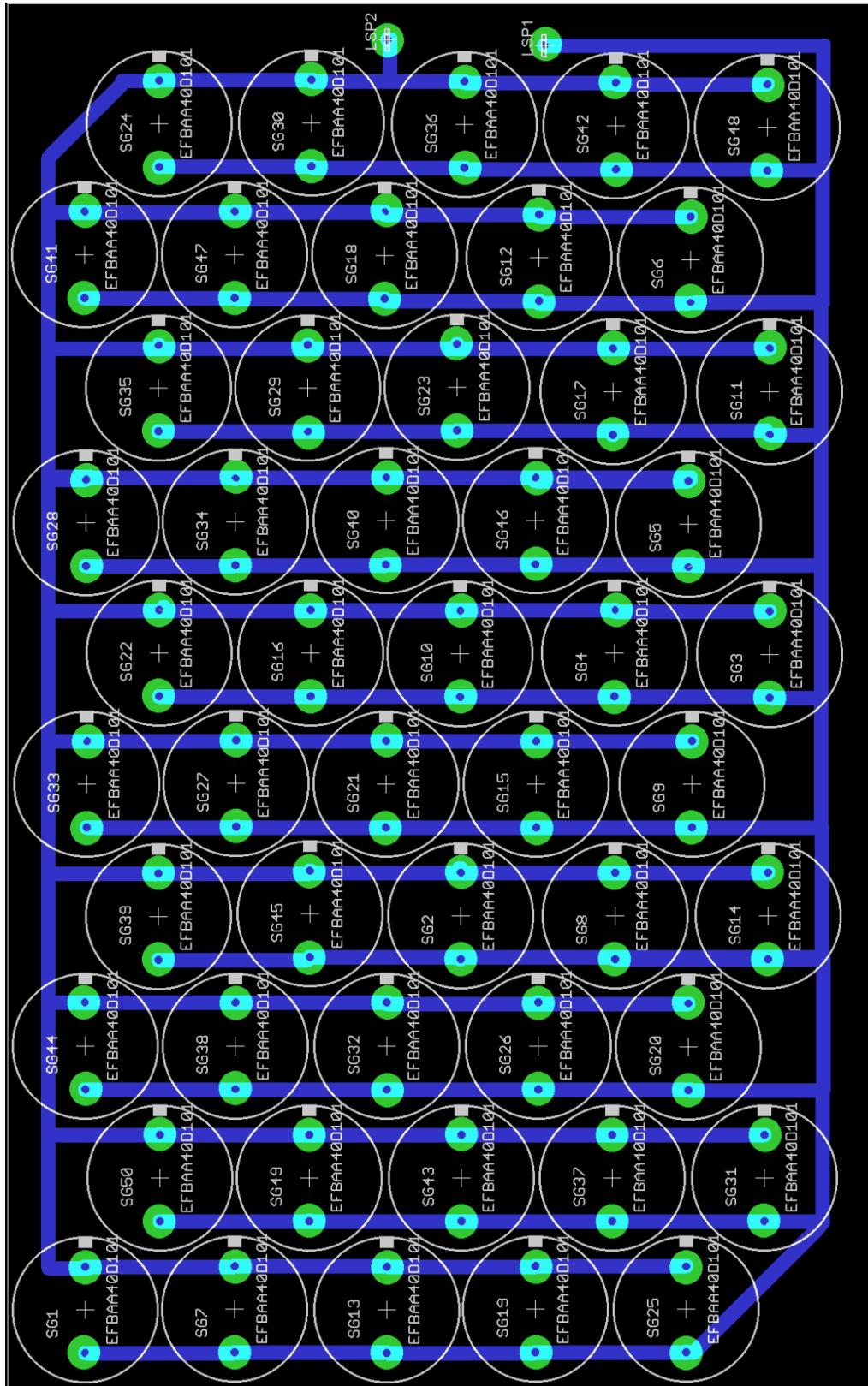


Slika 8.2. Dizajn pločice za modulator, pojačavač i regulator napona.

Potrebno je napomenuti da plave linije predstavljaju odštampane rute sa donje strane pločice, a crvene linije predstavljaju rute koje trebaju biti kratko spojene nakon izrade štampane pločice.

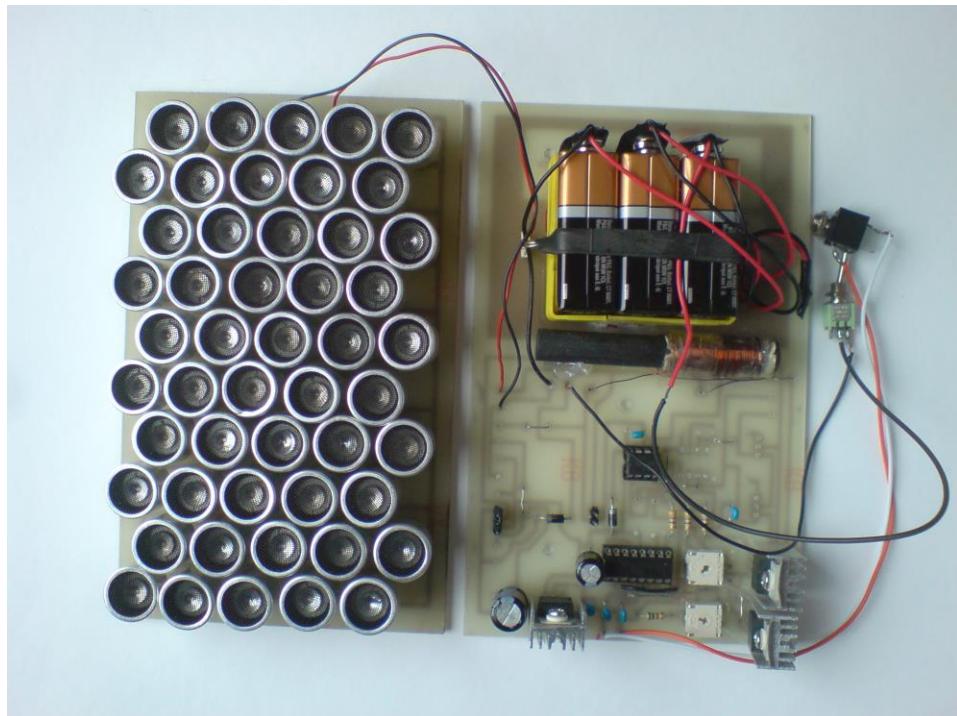


Slika 8.3. Shema senzora.



Slika 8.4. Dizajn pločice za senzore.

Na slici 8.5. je prikazan konačan izgled ultrazvučnog usmjerenog zvučnika, nakon izrade štampanih pločica i postavljanja potrebnih senzora i ostale elektronike.



Slika 8.5. Konačni izgled štampanih ploča

Pločice prikazane na slici 8.5. su zatim smještene u kućište zvučnika, što je prikazano na slici 8.6.



Slika 8.6. Ultrazvučni usmjereni zvučnik

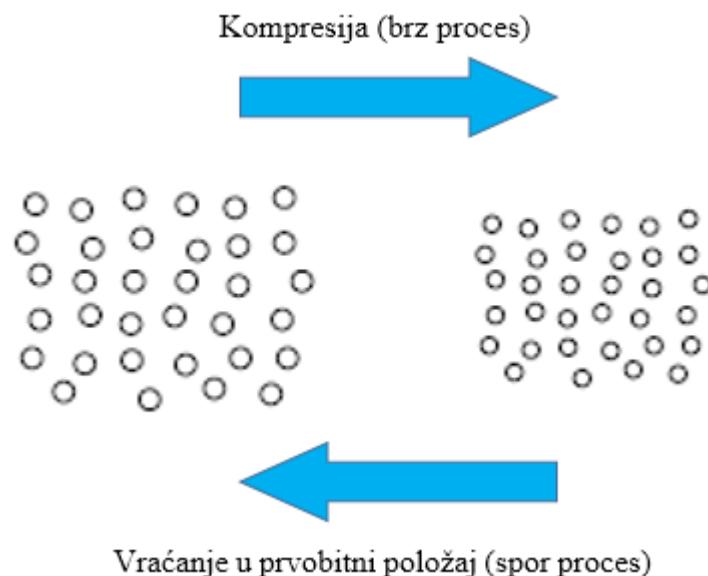
9. Demodulacija signala

U uvodnom dijelu rada je rečeno da je čovjek u stanju da percipira zvuk frekvencija unutar opsega od 20 [Hz] do 20 [kHz]. Prirodno je postaviti pitanje kako ljudsko uho može detektovati zvuk kojeg emituje PA, obzirom da se koristi ultrazvuk, tj. frekvencije iznad 20 [kHz].

Jedan od načina generisanja zvuka kojeg čovjek može percipirati je objašnjen u petom poglavlju, korištenjem dva ultrazvučna izvora čije se frekvencije međusobno razlikuju za iznos kojeg ljudsko uho može detektovati. Međutim, nedostatak ovakvog pristupa je mala jačina razgovijetnog zvuka.

Drugi način za generisanje razgovijetnog zvuka se zasniva na činjenici da je medij kroz koji se zvuk prostire, u ovom slučaju zrak, nelinearan. Nelinearnost medija će uzrokovati nelinearnu interakciju ultrazvučnih talasa koji se njime prostiru što će rezultirati generisanjem zvučnog talasa kojeg čovjek može percipirati.

Nelinearna karakteristika zraka je predstavljena činjenicom da je molekulama zraka potrebno više vremena da se vrate u prvobitne položaje nego što im je potrebno da budu kompresovane kao što je prikazano na slici 9.1. Prilikom povratka molekula zraka u prvobitne položaje dolazi do njihovog sudaranja sa kompresovanim molekulama. Na taj način se generiše novi zvučni talas kojeg je moguće percipirati. Zapravo, razgovijetni zvuk generiše svaka molekula koja se nije skroz vratila u prvobitni položaj [11].



Slika 9.1. Nelinearna karakteristika medija.

Navedeni fenomen je poznat pod pojmom samodemodulacija (eng. *self-demodulation*).

Za preciznu procjenu generisanja zvuka, osim nelinearnosti medija, u obzir je potrebno uzeti i difrakciju kao i apsorpciju zvuka. Matematska jednakost koja uzima navedene efekte u obzir je tzv. KZK⁴ jednakost:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} = \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}, \quad (9.6)$$

gdje je p zvučni pritisak, z osa putem koje se prostire talas, $\tau = t - z/c_0$ zaostalo vrijeme⁵, δ faktor disipacije koji odgovara apsorpciji zvuka, ρ_0 gustina zraka, a β koeficijent nelinearnosti zraka [6].

Iako je KZK jednakost jedna od najefikasnijih metoda za konstrukciju i analizu PA, ona je veoma kompleksna za praktičnu upotrebu.

⁴ Khoklov-Zabolotskaya-Kuznetsov jednakost

⁵ Zaostalo vrijeme se definiše kao vrijeme koje prođe od trenutka prostiranja talasa do trenutka kada stigne do posmatrača. Termin „zaostalo“ se u ovom slučaju koristi u smislu propagacijskog kašnjenja.

10. Primjena ultrazvučnih usmjerjenih zvučnika

Ultrazvučni usmjereni zvučnici su pogodni za razne primjene zbog velike usmjerenosti signala koju pružaju i malih dimenzija. Moguće ih je koristiti u prodavnicama, kioscima itd. za reklamiranje proizvoda.

Naročito su pogodni u muzejima i galerijama gdje ih je moguće postaviti iznad umjetničkih djela, skulptura i slično, tako da samo onaj ko stoji ispred određenog objekta može čuti historiju i neke interesantne činjenice o tom objektu, bez ometanja ostalih posjetilaca.

Također, pokazano je da se PA može koristiti i u sistemima za kontrolu šuma (eng. *Active Noise Control Systems – ANC*⁶). Upotrebom PA je, zbog izrazite usmjerenosti, moguće veoma precizno emitovati signal u određeno područje u kojem se želi smanjiti šum, bez da se unosi dodatni šum u ostali dio područja [6].

Ultrazvučni usmjereni zvučnici se mogu koristiti i za detekciju sakrivenih objekata, kao npr. oružja, mina, itd. sa sigurnih udaljenosti. Također, njihova upotreba je moguća i za mjerjenje akustičnih performansi raznih materijala.

Pokazano je da se ovi zvučnici mogu koristiti i u podvodnim aplikacijama. Jedna od novijih tehnologija koja koristi usmjerene zvučnike je tzv. parametrijski sonar (eng. *parametric sonar*) [6].

PA se mogu koristiti i za međusobnu komunikaciju kao npr. na brodovima umjesto VHF radiotelefonskih primopredajnika ako postoji optička vidljivost između brodova. Upotreba PA na brodovima između kojih postoji optička vidljivost je veoma pogodna jer ne postoji mogućnost prisluškivanja komunikacije, što nije slučaj sa radio komunikacijama.

Također, u bibliotekama i kinima je moguće koristiti PA u svrhu upozoravanja osoba koje ometaju druge posjetioce.

Osim navedenih primjena, PA se može koristiti i kao oružje obzirom da je moguće usmjeriti zvučni snop ka određenoj osobi ili skupini ljudi. Dovoljno je generisati signal koji je nepodnošljiv za ljudsko uho i usmjeriti ga ka nekoj skupini ljudi.

⁶ ANC predstavlja metodu za smanjenje nepoželjnog zvuka tako što se dodaje novi zvuk koji je u protufazi sa nepoželjnim zvukom

11. Uticaj ultrazvuka na ljudsko tijelo

Ultrazvučni talasi predstavljaju jedan oblik izražene energije, što znači da će apsorpcija te energije uzrokovati zagrijavanje. Međutim, ljudska koža reflektuje skoro 99,90% ultrazvučne energije uslijed velike razlike impedansi zraka i kože [6]. Stoga se glavni efekti izlaganja ultrazvuku svode na efekte slušnog sistema.

Najčešći simptomi koji su primijećeni prilikom dugog izlaganja ultrazvuku su glavobolja, umor, mučnina, a moguća je i pojava privremenog gubitka sluha u slučaju veoma jakog ultrazvučnog signala [6].

f [kHz]	Japan (1971)	Australija (1981)	Francuska (1985)	Poljska (1986)	SSSR (1989)	Kanada (1991)	Švedska (1992)	Poljska (2001)
6.3	90							
8	90							
10	90	75	75	80				80
12.5	90	110	75	80	80			80
16	90	110	75	80	80	75		80
20	110	110	75	90	100	75	105	90
25	110	110	110	105	105	110	115	105
31.5	110		110	110	110	110	115	110
40	110		110	110	110	110	115	110
50	110		110	110	110	110	115	
63				110	110		115	
80				110	110		115	
100				110	110		115	
125							115	
150							115	
160							115	
200							115	

Tabela 11.1. Dozvoljene jačine ultrazvučnog signala u [dB] u različitim državama (tabela preuzeta iz [15]).

U praksi PA najčešće rade u opsegu frekvencija od 40 [kHz] do 60 [kHz]. Iz tabele 11.1. se može zaključiti da za taj opseg frekvencija jačina ultrazvučnog signala ne bi trebala prelaziti 110 [dB].

Međutim, da bi se postigla zadovoljavajuća jačina demodulisanog, tj. razgovijetnog signala, koja iznosi oko 80 [dB], pokazano je da bi jačina ultrazvučnog signala trebala biti mnogo veća od 110 [dB], tj. oko 140 [dB], a možda i više [12].

Dakle, prilikom dizajniranja PA je veoma važno razmotriti na koji način je moguće smanjiti jačinu ultrazvučnog signala na dozvoljeni nivo, a da se pri tome ne smanji efikasnost PA.

12. Zaključak

Tema završnog rada je bila konstrukcija ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika. Napravljen je kratak osvrt na standardne zvučnike te je izvršena njihova usporedba sa usmjerenim zvučnicima. Prikazani su dijagrami zračenja oba tipa zvučnika i pokazano je od čega zavisi usmjerenošć zvučnog talasa.

Za izradu ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika, kao predajnik, je korišten niz od 50 ultrazvučnih pretvarača čiji se rad zasniva na piezoelektričnom efektu, pa je stoga obrađen i piezoelektrični efekat.

U radu su analizirane i modulacije koje su karakteristične za usmjereni zvučnik, kao i prednosti i nedostaci pomenutih modulacija. U simulacionom programu Proteus 8 je izvršena analiza kola TL494 te je prikazano kako promjena vrijednosti komponenti utiče na PWM modulaciju korištenu u ovom radu.

Nakon teoretske analize, pristupilo se testiranju sklopa na matadoru. Nakon što je provjerena ispravnost i funkcionalnost sheme na matadoru, pristupilo se izradi štampanih pločica za usmjereni zvučnik, a zatim su snimljeni signal nakon modulacije i izlazni signal koji se dalje vodi na niz ultrazvučnih predajnika.

Tokom testiranja zvučnika izvršeno je nekoliko eksperimenata. Prvo, pretvarači su bili poredani nasumično, bez određivanja njihovih faza. Primjećena je blaga usmjerenošć zvučnog snopa. Nakon određivanja faza pretvarača i njihovog pravilnog raspoređivanja usmjerenošć zvučnika se značajno povećala. Također, pokazano je i da usmjerenošć zvučnika zavisi od fizičkog položaja pretvarača na pločici. Ukoliko se pretvarači ne poredaju ravno na pločici, tj. ukoliko su neki pretvarači nakrivljeni, dolazi do međusobnog poništavanja signala, tj. destruktivne interferencije signala. Obzirom da je frekvencija ultrazvučnog usmjerjenog zvučnika reda 40 [kHz] do 60 [kHz], slijedi da je talasna dužina zvučnog talasa reda 5 [mm] do 8 [mm], što znači da prostorni pomak pretvarača od 1 [mm] može dovesti do promjene faze signala, a samim tim i do smanjenja usmjerenošći i snage signala.

Također, sklop je testiran sa i bez upotrebe zavojnice pomenute u osmom poglavlju. Svrha zavojnice je da omogući rad piezoelektričnih pretvarača na njihovoј rezonantnoј frekvenciji obzirom da oni tad ostvaruju najbolje performanse. U slučaju kada se koristila zavojnica, sklop je generisao jači zvuk nego u slučaju bez zavojnice.

Upotrebom sklopa u malim prostorijama se ne stiče dojam da zvučnik emituje usmjerene talase jer dolazi do refleksije zvučnih talasa od čvrstih i ravnih podloga kao što su zidovi, prozori itd. Prilikom testiranja u maloj prostoriji, primjećeno je da osoba čuje zvuk kojeg emituje usmjereni zvučnik iako je stajala neposredno iza zvučnika. Zanimljiva činjenica je da je osoba imala osjećaj kao da zvuk izvire iz zida od kojeg se zvuk reflektovao. Za upotrebu na otvorenom prostoru je potrebno povećati broj pretvarača obzirom da je na taj način moguće povećati snagu signala.

Tokom testiranja sklopa, jedini uticaj na ljudsko tijelo koji je bio primijećen je blaga glavobolja.

Literatura

- [1] Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications*, 4th Edition, Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] Melita Ahić-Đokić, Signali i sistemi, *Elektrotehnički fakultet u Sarajevu*, 2010.
- [3] B. P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, 3rd Edition, Oxford University Press, 1998.
- [4] Leo L. Beranek, *Acoustics*, Acoustical Society of America, 1993.
- [5] Alan S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, 3rd Edition, Butterworth Heinemann, 2001
- [6] Woon-Seng Gan, Jun Yang, Tomoo Kamakura, *A review of parametric acoustic array in air*, Applied Acoustics 73.12 (2012): 1211-1219.
- [7] Chuang Shi, Woon-Seng Gan, *Development of a parametric loudspeaker*, IEEE Potentials 29.6 (2010): 20-24.
- [8] Laura A. Brooks, Anthony C. Zander, Colin H. Hansen, *Investigation into the feasibility of using a parametric array control source in an active noise control system*, Proceedings of Acoustics, 2005
- [9] James J. Croft, Joseph O. Norris, *Theory, History and the Advancement of Parametric Loudspeakers*, White Paper, American Technology Corporation, Diego, CA, 2002.
- [10] Ee-Leng Tan, Woon-Seng Gan, Jun Yang, *Preprocessing techniques for parametric loudspeakers*, Audio, Language and Image Processing, 2008. ICALIP 2008. International Conference on. IEEE, 2008.
- [11] Kazunori Miura, *Ultrasonic Directive Speaker*, Elektor Magazine 3 (2011): 2011
- [12] Jianfeng Chen, *Power Conversion Efficiency of Airborne Parametric Array*, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2002
- [13] Texas Instruments, TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits, [Na mreži], Dostupno: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf> [Posljednji pristup 05.06.2016.]
- [14] International Rectifier, IR2111(S)&(PbF) Half-Bridge Driver [Na mreži], Dostupno: <http://www.infineon.com/dgdl/ir2111.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c810e51682> [Posljednji pristup 05.06.2016.]
- [15] Božena Smagovska, M. Pawlaczyk-Luszczynska, *Effects of Ultrasonic Noise on the Human Body*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 2013

Lista slika

Slika 2.1. Grafička interpretacija signala: a) analogni signal, b) diskretni signal, c) kvantizirani signal, d) digitalni signal	3
Slika 3.1. Dijagram zračenja klasičnih zvučnika	5
Slika 3.2. Grafički prikaz ovisnosti usmjerenosti snopa i talasne dužine	6
Slika 3.3. Grafički prikaz ovisnosti usmjerenosti snopa i veličine izvora	6
Slika 3.4. Blok dijagram generisanja ultrazvučnog talasa	7
Slika 3.5. Dijagram zračenja PA	7
Slika 3.6. Shema PA.....	8
Slika 4.1. Piezoelektrični efekat u kristalu kvarca	9
Slika 4.2. Piezoelektrični ultrazvučni pretvarač: a) na predajnoj strani, b) na prijemnoj strani.....	10
Slika 4.3. Ultrazvučni pretvarač.....	10
Slika 5.1. Nelinearna interakcija signala u mediju	11
Slika 5.2. Grafička interpretacija amplitudno modulisanog signala.....	12
Slika 5.3. Amplitudni spektar signala modulisanog harmonijskom funkcijom	13
Slika 5.4. Grafička interpretacija SR AM modulisanog signala: a) vremenski prikaz i b) frekvencijski spektar.....	14
Slika 5.5. Grafička interpretacija SSB AM modulisanog signala: a) vremenski prikaz i b) frekvencijski spektar.....	15
Slika 5.6. Vremenski oblik PWM signala.....	16
Slika 5.7. Grafička interpretacija PWM modulisanog signala	16
Slika 6.1. Blok shema PA	18
Slika 6.2. Shema obrade i pojačanja signala	18
Slika 6.3. Raspored pinova kola TL494 i njihova značenja.....	19
Slika 6.4. Ulagani i izlazni signali iz kola TL494	19
Slika 6.5. Ulagani i izlazni signali iz kola TL494 sa promijenjenim vrijednostima pontenciometara	20
Slika 6.6. Elektronska shema integralnog kola TL494.....	20
Slika 6.7. Raspored pinova kola IR2111 i njihova značenja.....	21
Slika 6.8. Tipična shema spajanja integralnog kola IR2111	21
Slika 7.1. Ulagani signal doveden na pin 4 kola TL494.....	22
Slika 7.2. Signal na izlazu kola TL494 nakon PWM modulacije.....	23
Slika 7.3. Signal na izlazu sklopa (kanal A)	23
Slika 8.1. Shema modulatora, pojačavača i regulatora napona korištena za izradu sklopa	24
Slika 8.2. Dizajn pločice za modulator, pojačavač i regulator napona	25
Slika 8.3. Shema senzora	26
Slika 8.4. Dizajn pločice za senzore	27
Slika 8.5. Konačni izgled štampanih ploča.....	28
Slika 8.6. Ultrazvučni usmjereni zvučnik.....	28
Slika 9.1. Nelinearna karakteristika medija.....	29

Lista tabela

Tabela 2.1. Analogni i digitalni signali.....	3
Tabela 11.1. Dozvoljene jačine ultrazvučnog signala u [dB] u različitim državama.....	32

Lista skraćenica

ANC	– Sistemi za aktivnu kontrolu šuma
DSB AM	– Dvostrana amplitudna modulacija
HO	– Izlaz visokog nivoa
KZK	– Khoklov-Zabolotskaya-Kuznetsov
LO	– Izlaz niskog nivoa
LSB	– Niži bočni opseg
PA	– Parametrijski niz
PWM	– Širinsko impulsna modulacija
SR AM	– <i>Square-root</i> amplitudna modulacija
SSB AM	– Jednostrana amplitudna modulacija
USB	– Viši bočni opseg