

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Peter Oblak

**Razvoj in izdelava 50 W
ojačevalnika električnih pulzov
frekvenc do 500 kHz**

Magistrska naloga

Mentor: prof. dr. Dejan Križaj

Ljubljana, 2015

Zahvala

Zahvalil bi se mentorju prof. dr. Dejanu Križaju za pomoč, svetovanje in mnoge ideje, s katerim je moje delo še boljše in bogatejše, kot bi bilo sicer. Zahvalil bi se tudi sodelavcem Laboratorija za bioelektromagnetiko, v katerem sem imel dobre pogoje za izdelavo magistrske naloge. Na koncu gre zahvala moji družini, ki me je podpirala in stala ob strani skozi mojo izobraževalno pot na Fakulteti za elektrotehniko.



Vsebina

Seznam slik

Seznam tabel

Seznam uporabljenih simbolov

V pričujoči magistrski nalogi so uporabljene naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
frekvenca	f	hertz	Hz
napestost	U	volt	V
električni dipolni moment	p_e	debye	debye
polarizacija	P	-	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$
električna poljska jakost	E	-	V/m
mehanska obremenitev	T	-	N/m^2
piezoelektrična napetost kristala	d	-	$\mu\text{m}/\text{V}$
sila	F	newton	N
površina	A	-	m^2
mehanska napetost	σ	-	N/m^2
gostota električnega polja	D	-	As/m^2
piezoelektrična konstanta naboja	g	-	$\mu\text{m}^2/\text{As}$

Tabela 1: Veličine in simboli

Natančnejši pomen simbolov in njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

Povzetek

V magistrski nalogi je opisana izdelava ojačevalnika za ultrazvočne oddajnike do frekvenc 500 kHz. Zasnova vezja je bila uporabljen že v nekaterih podobnih aplikacijah, dodal pa sem nekaj dodatnih komponent, saj je ojačevalnik prilagojen za ojačanje signalov, ki so specifični in so namenjeni za uporabo v medicini.

V uvodu se bralec seznani z vsebino in problematiko magistrske naloge. Predstavljene so osnove, ki so pomembne za razumevanje nadaljnjih poglavij. Opisana je zgodovina ultrazvoka, model ultrazvočnega oddajnika, kako ga modeliramo, predstavljene so nekatere možne topologije ultrazvočnega oddajnika, teorem o maksimalnem prenosu moči, prikaz resonančnega vezja, impedančno prilagajanje in krmiljenje mosfet (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor) tranzistorjev. V tretjem poglavju je predstavljena simulacija push-pull vezave dveh mosfet tranzistorjev in simulacija ostalih možnih vezav za ojačanje ultrazvočnega signala. V četrtem poglavju je opisana izdelava tiskanega vezja od načrtovanja, simulacije do praktične izvedbe in testiranja delovanja. V zadnjem poglavju so predstavljene meritve in rezultati, dobljeni med izdelavo ojačevalnika, ki so bile izmerjene na posameznih stopnjah ojačevalnika ali na delih pomembnih za njegovo delovanje.

Ključne besede: Ultrazvočni ojačevalnik, ultrazvočni oddajnik, ultrazvok, push-pull vezava.

Abstract

The thesis addresses the construction of the amplifier for the ultrasonic transmitters of frequency 500 kHz. The design of the circuit has already been used in some other applications. I added few additional components since the amplifier is adapted to amplify signals that are specific and are intended for use in medicine.

In the introduction, the reader is acquainted with the content and the issue of a thesis. Presented are the basics that are important for understanding the subsequent chapters. Described is the history of ultrasound, the ultrasound transmitter model, how it is modeled, presented some possible topologies ultrasonic transmitter, theorem of maximum power transfer, display of resonant circuits, impedance matching and controlling the MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) transistors. In the third chapter presents the simulation of push-pull connection of two MOSFET transistors and the simulation of other possible connections for amplifying ultrasonic signal. The fourth chapter describes the manufacture of printed circuit design, simulation of practical implementation and performance testing. In the last chapter presents measurements and results obtained during the production of amplifiers, which were measured at each stage of the amplifier or significant parts of its operation.

Key words: Ultrasound amplifier, ultrasound transducer, ultrasound, push-pull topology.

1 Uvod

1.1 Problematika dela

Na področju ultrazvoka in ultrazvočnih naprav za množično uporabo je bilo do sedaj narejenega že marsikaj. Obkroženi smo z množico naprav, ki delujejo v ultrazvočnem spektru. Če jih naštejemo samo nekaj: merilniki razdalje, senzorji razdalje, razvlaževalniki zraka, diagnostični ultrazvok v medicini za preglede različnih organov, merjenje pretokov tekočin, ultrazvočno čiščenje in še bi lahko naštevali. V magistrski nalogi sem se osredotočil na izdelavo ultrazvočnega ojačevalnika, ki bo deloval pri frekvenci 350 kHz in bo služil za ojačanje ultrazvočnega signala. Namenjen bo za stimuliranje specifičnih pulzov, s katerimi naj bi vzbujali določene dele možganov ali omogočili odprtje celičnih membran za prehod zdravil do obolelih celic tkiva. Danes je to področje zanimivo za raziskovalce, čez nekaj let pa bo mogoče postala to stalna praksa pri zdravljenju bolezni. Prednost ultrazvočne stimulacije pred ostalimi metodami, ki se uporabljajo v medicini, je tudi v tem, da **ga** je možno usmeriti v zelo ozkem področju. Povedano drugače, ultrazvok je možno v določeni razdalji od oddajnika fokusirati v točko, kar bi pomenilo, da bi vplivali samo na prizadet del tkiva brez poškodbe zdravega tkiva v okolici.

1.2 Namen magistrske naloge

Namen magistrske naloge je izdelati ultrazvočni ojačevalnik, ki bo deloval pri frekvenci 350 kHz in ugotoviti ali je mogoče s tem ojačevalnikom ojačati tudi signale v širšem frekvenčnem območju. Na izhodni stopnji mora ojačevalnik zagotoviti moči okrog 40 W. Shema ojačevalnika ni podana, zato je potrebno pregledati kakšne vezave že obstajajo, narediti simulacije različnih vezav in se odločiti za eno izmed njih. Ojačevalnik bo služil za ojačanje signalov frekvenc okrog 350 kHz in amplitude 2 V vršne vrednosti. Ko bo prototip ojačevalnika narejen, je zaželen tudi test delovanja, za kar je potrebno imeti napravo, ki lahko sprejme signal in ga ponovno pretvori v električni signal, da ga lahko izmerimo. Za generiranje

in prikaz signala je potrebno uporabiti merilni sistem Red Pitaya, ki je produkt slovenskega podjetja in omogoča veliko možnosti za generiranje ter prikazovanje merilnih rezultatov. Ker je sistem zanimiv, bi ga lahko koristno uporabili pri ultrazvočnem ojačevalniku in nadaljnjem razvoju izdelka.

1.3 Struktura magistrskega dela

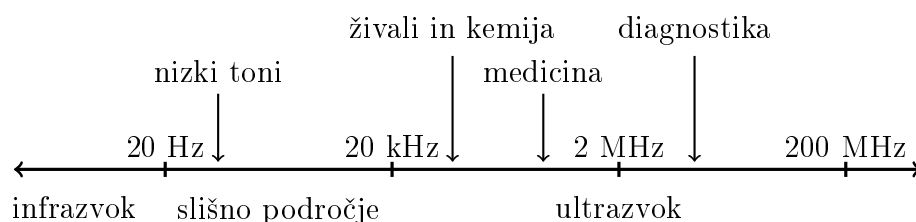
Magistrsko delo je razdeljeno na več poglavij, kot so predstavljena na začetku magistrskega dela. Sestavljeno je iz teoretičnega dela, simulacij in praktičnega dela, kjer so tudi predstavljene meritve in končni rezultati. V prvem poglavju je predstavljena problematika ultrazvoka, ultrazvočnih naprav in uporaba ultrazvoka v medicinske namene. V drugem poglavju so predstavljene osnove, ki jih mora bralec poznati za lažje razumevanje ultrazvoka, vezij in naprave. V tretjem poglavju so prikazane simulacije vezij, s katerimi bi se dalo realizirati ojačevalnik. Predstavljene so komponente vezja za delovanje ojačevalnika v push-pull vezavi transformatorja in dveh tranzistorjev. V četrtem poglavju je opisana izdelava tiskanega vezja od risanja sheme, PCB (printed circuit board) vezja do prikaza končnega izdelka. V petem poglavju so predstavljene meritve in rezultati, ki sem jih izmeril tekom izdelave magistrske naloge. Sledi še zaključek, kjer sem povzel končne ugotovitve in rezultate magistrske naloge.

2 Predstavitev delovanja ultrazvoka, ojačevalnika in ultrazvočnega oddajnika

2.1 Ultrazvok

2.1.1 Definicija ultrazvoka

Ultrazvok je longitudinalno zvočno valovanje s frekvenco, ki je višja od zgornje meje slišnega območja, kar je pri zdravem človeku okoli 20 kHz. Pri nekaterih živalih je zgornja meja slišnega področje višja kot pri človeku, zato lahko slišijo tudi ultrazvok. Uporablja se na eno ali drugo področje: v medicini, raziskavah materialov, merjenju razdalj, hitrosti... Področje slišnega zvoka, infrazvoka in ultrazvoka je prikazan na sliki ?? [?].



Slika 2.1: Področje valovanja.

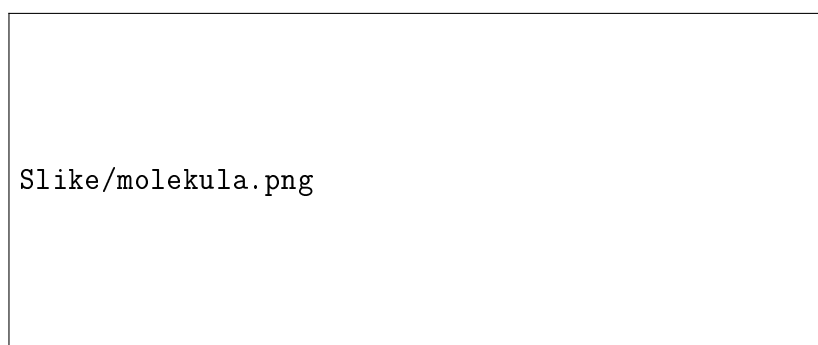
2.1.2 Kratka zgodovina ultrazvoka

Zgodovina razvoja ultrazvoka in ultrazvočnih aplikacij v medicini se je pričela s poskusi merjenja razdalj pod vodo z uporabo zvočnega vala. Uporabno vrednost ultrazvoka sta omogočila Francoza Pierre in Jacques Curie, ki sta leta 1880 v Parizu odkrila piezoelektrični efekt. Ugotovila sta, da bi z mehanskim pritiskom na kvarčni kristal ustvarila električni potencial. Obraten postopek je leto kasneje z matematičnimi formulami izvedel fizik Gabriel Lippman, ki je izhajal iz termodinamičnih principov. Leta 1912 je bil razvit podvodni sonar za navigacijo ladij za potrebe mornarice. Leta 1914 so s sonarjem opremili prve ladje in podmornice. V medicini se je ultrazvok najprej uporabljal v terapevtske namene (leta 1920), kasneje pa tudi v diagnostiki. Z leti se je pridobljeno znanje o ultrazvoku preneslo tudi na druga področja uporabe. Leta 1942 je nevrolog in psihiater Karl Theo

Dussik na Dunajski univerzi prvi uporabil ultrazvok za diagnozo tumorja na možganih. Leta 1948 je George Döring Ludvig. prvi opisal postopek za diagnozo žolčnih kamnov z uporabo ultrazvoka. Od leta 1950 do danes se je ultrazvok razširil na področja, kjer ga pred nekaj desetletji nebi pričakovali. Danes zasledimo uporabo ultrazvoka v različnih napravah, ki nas obkrožajo [?].

2.1.3 Piezoelektrični efekt

Piezoelektrični efekt oziroma nastanek električnih dipolov pod vplivom mehanske obremenitve lahko enostavno razložimo z opazovanjem posamezne molekule materiala pri mehanski obremenitvi. Na sliki ?? je prikazana tipična molekula piezoelektričnega materiala, sestavljena iz dveh vrst atomov, A in B, zgradbe $B^{3+} A^{3-}$. Slika ??a prikazuje molekulo brez mehanske obremenitve. Zaradi simetrične porazdelitve nabojev v tem primeru centra pozitivnih in negativnih nabojev sovpadata, dipolni moment posamezne molekule in s tem dielektrična polarizacija materiala P v celoti so enaki 0! Na sliki ??b je prikazana ista molekula v primeru mehanske obremenitve.



Slika 2.2: Neobremenjena (a) in obremenjena (b) molekula piezoelektričnega materiala.

Zaradi obremenitve se molekule materiala deformirajo, posledica je premik nabojev. Centra pozitivnih in negativnih nabojev ne sovpadata oziroma se razmakneta. Posledica tega razmika naboja je induciran električni dipolni moment

p opazovane molekule, ki se izračuna po enačbi ??.

$$p = q \cdot l \quad (2.1)$$

Posledica nastanka dipolnih momentov v dielektričnem materialu je dielektrična polarizacija, ki se izračuna po enačbi ??. Dielektrična polarizacija materiala P je določena s prispevkom vseh dipolov po obravnavanem volumnu V oziroma je po dogovoru enostavno vektorska vsota vseh dipolnih momentov, deljena z volumnom obravnavanega materiala.

$$P = \frac{l}{V} \sum_V p_i \quad (2.2)$$

Kot posledica dielektrične polarizacije materiala se pojavi v kristalu, kot prikazuje slika ??, v obremenjenem piezoelektričnem materialu tudi električno polje E in s tem električna napetost U med zgornjo in spodnjo površino. Pri dovolj

Slike/Dielektricni_material.png

Slika 2.3: Razmere v neobremenjenem (a) in obremenjenem (b) piezoelektričnem materialu.

majhnih obremenitvah je zveza med dielektrično polarizacijo P in mehansko obremenitvijo T linearna

$$P = d \cdot T \quad (2.3)$$

kjer je $d[\mu\text{m}/\text{V}]$ piezoelektrična napetostna konstanta, ki podaja, kolikšna napetost $V[\text{V}]$ se pojavi na danem materialu pri deformaciji za $1 \mu\text{m}$.

Mehanska obremenitev oziroma pritisk je podan s silo F na dano površino A in jo v mehaniki običajno označimo s črko T (Tension).

$$T = \frac{F}{A} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.4)$$

Mehanska obremenitev T ima torej enoto $[\text{N/m}^2]$, kjer je N simbol za enoto sile (Newton). Po dogovoru velja pri nategu $T > 0$, pri stisku pa $T < 0$. Mehanska deformacija je definirana kot relativna sprememba dimenzije telesa zaradi mehanske obremenitve in jo označimo običajno s črko S (Strain).

$$S = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.5)$$

Električno polje v piezoelektričnem materialu v splošnem primeru tako električne (εE) kot omenjene mehanske (P) dielektrične polarizacije določimo iz izraza za gostoto električnega polja D ob upoštevanju obeh prispevkov

$$D = \varepsilon E + dT \quad (2.6)$$

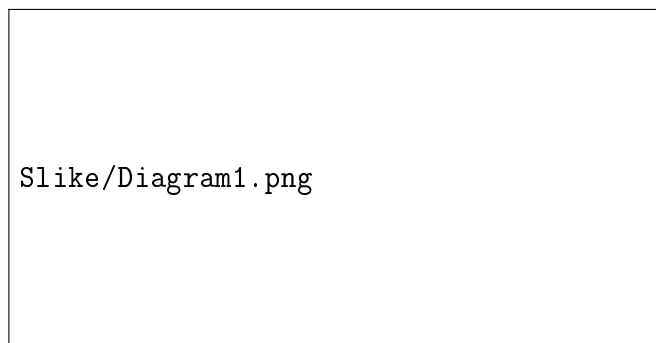
Električno polje v piezoelektričnem materialu je torej podano z izrazom

$$E = -\frac{d}{\varepsilon}T + \frac{l}{\varepsilon}D = -gT + \frac{l}{\varepsilon}D \quad (2.7)$$

kjer smo vpeljali piezoelektrično konstanto naboja $g = d/\varepsilon$ $[\mu\text{m}^2/\text{As}]$. Konstanta g podaja ploskovni naboj, ki se pojavi zaradi obremenitve. Napetost V , ki se pojavi na piezoelektričnem materialu kot posledica mehanske obremenitve, je pri znanem električnem polju E in debelini materiala l določena z enostavnim izrazom

$$V = E \cdot l \quad (2.8)$$

Diagram na sliki ?? podaja napetost na nekem piezoelektričnem materialu v odvisnosti od mehanske obremenitve. Zanimivo je, da imajo lahko nastopajoče napetosti zelo visoke vrednosti. Opazimo tudi, da pride pri prehodu od natezne obremenitve ($T > 0$) na tlačno oziroma stisk ($T < 0$) do spremembe predznaka inducirane napetosti. Obstojata tudi obratni (inverzni) piezoelektrični efekt. Če pritismo na piezoelektrični kristal električno polje, se zaradi električnih sil na



Slika 2.4: Napetost na piezoelektričnem kristalu v odvisnosti od mehanske obremenitve.

naboje v materialu ($F = qE$) le-ta deformira! Tudi v tem primeru velja, da je pri majhnih deformacijah zveza med deformacijo zaradi električnega polja S_E in poljem E linearna

$$S_E = dE \quad (2.9)$$

kjer je d že znana piezoelektrična konstanta.

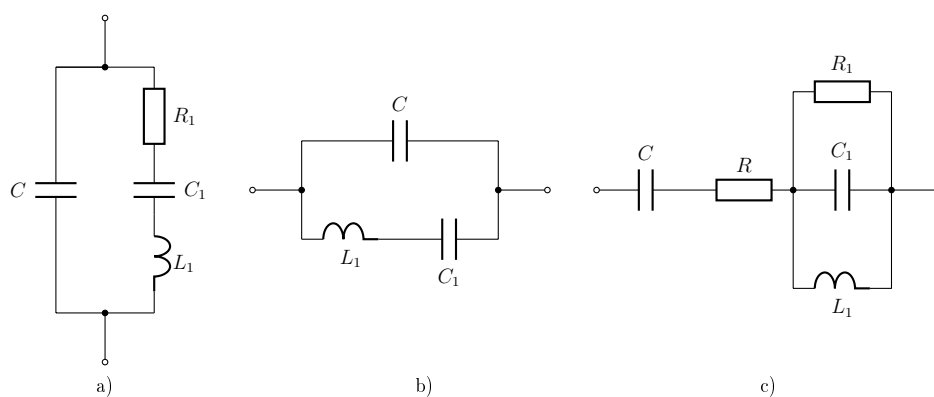
V splošnem imamo lahko poleg te deformacije prisotno še deformacijo zaradi mehanske napetosti, ki jo opisuje Hookeov zakon ($S_T = sT$). Deformacijo piezoelektričnega kristala S lahko v splošnem zapišemo kot vsoto obeh prispevkov

$$S = dE + sT \quad (2.10)$$

Tipična vrednost maksimalnih deformacij pri teh materialih, ki jo lahko dosežemo pri velikih enosmernih električnih poljih ($E \sim 500 \text{ V/mm}$), znaša $S_E = \Delta l/l = 10^{-4}$ oziroma 0,1 %. Pri izmeničnih razmerah lahko v resonanci dobimo še znatno višje vrednosti deformacije kristala. Opisane zveze veljajo med mehansko inducirano električno napetostjo na piezoelektričnem kristalu ter pripadajočo mehansko deformacijo kristala. Direktne ali indirektni piezoelektrični efekti so našli številne zanimive aplikacije v različnih področjih elektronike in senzorike [?].

2.2 Modeli ultrazvočnih oddajnikov

Poznanih je več vrst ultrazvočnih oddajnikov (ang. ultrasound transducer), ki so prikazani na sliki ???. Večina tehnik modeliranja ultrazvočnih oddajnikov izhaja iz teoretičnih principov. Modeliranje zahteva znanja iz področja lastnosti materialov in fizičnih dimenzij oddajnika. Najpogostejši je model BVD (Butterworth-Van Dyke), ki je podrobneje opisan v poglavju ???.

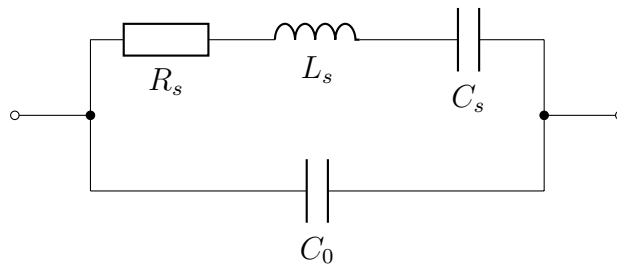


Slika 2.5: Električni modeli piezoelektričnih oddajnikov (a) Butterworth-Van Dyke model (b) Sherrit model (c) Easy model.

Da ultrazvočni oddajnik deluje pravilno, ga je potrebno vzbujati z določenim signalom. Ker so ti signali običajno zelo šibki, jih je potrebno s prilagoditvenim vezjem ojačati in impedančno prilagoditi zahtevanemu bremenu [?].

2.2.1 BVD model

Butterworth-Van Dyke model prikazan na sliki ?? je osnoven električni model piezoelektričnega elementa, ki je priznan tudi v IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardu o piezoelektričnosti [?]. Model predstavlja elektromehanične karakteristike piezoelektričnega materiala. Butterworth-Van Dyke model je najboljši približek realnemu oddajniku. Kapacitivnost piezoelektričnega signala predstavlja kondenzator C_0 , mehanski del pa je modeliran kot serijsko resonančno vezje L_s , C_s in R_s . Spremembe na mehničnem robu so modelirane



Slika 2.6: Butterworth-Van Dyke model ultrazvočnega oddajnika.

s spremembo R_s in C_s , medtem ko spremembo induktivnosti L_s opisuje masa mehničnega sistema. Spremembe na mehničnem robu R_s lahko razstavimo na dve komponenti.

$$R_s = R_0 + R_{xm} \quad (2.11)$$

Kjer R_0 predstavlja izgube v piezo-keramičnem materialu, R_{xm} pa akustično oddajanje v medij. R_{xm} predstavlja večinski del, napajalno napetost na R_0 lahko smatramo kot akustične motnje [?].

Impedanca zgornjega vezja lahko izrazimo z enačbo ??

$$Z = \frac{(R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}) \frac{1}{j\omega C_0}}{R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega C_0}} \quad (2.12)$$

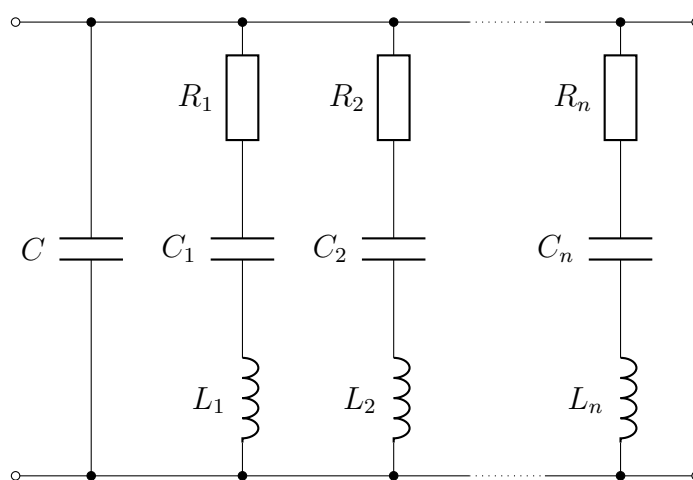
Iz enačbe ?? dobimo enačbo ?? za serijsko resonančno frekvenco in enačbo ?? za paralelno resonančno frekvenco.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (2.13)$$

$$\omega_l = \frac{1}{\sqrt{L_s \frac{C_s C_0}{C_s + C_0}}} \quad (2.14)$$

Zastavlja se vprašanje kako dobiti vrednosti BVD modela. Impedanco piezoelektričnega oddajnika je možno izmeriti. Eden od načinov meritev je z omrežnim analizatorjem. Če je piezoelektrični oddajnik priključen na vezju in napajanje zahtevano napetostjo, lahko merimo tok, s pomočjo katerega lahko določimo impedanco oddajnika. Iz impedančnega poteka meritve vidimo, da graf doseže vrh in

nato začne padati pri določenih frekvencah. Tem frekvencam rečemo resonančne frekvence oddajnika. Ko je piezoelektrični oddajnik spojen z drugim materialom, lahko vplivamo na impedanco z elektromagnetno spojitvijo in tako spremenimo resonančno frekvenco oddajnika. To je eden od postopkov dela s piezoelektričnim oddajnikom. Če želimo spremeniti resonančno frekvenco modela, ga lahko razširimo tako, kot je prikazano na sliki ?? [?].



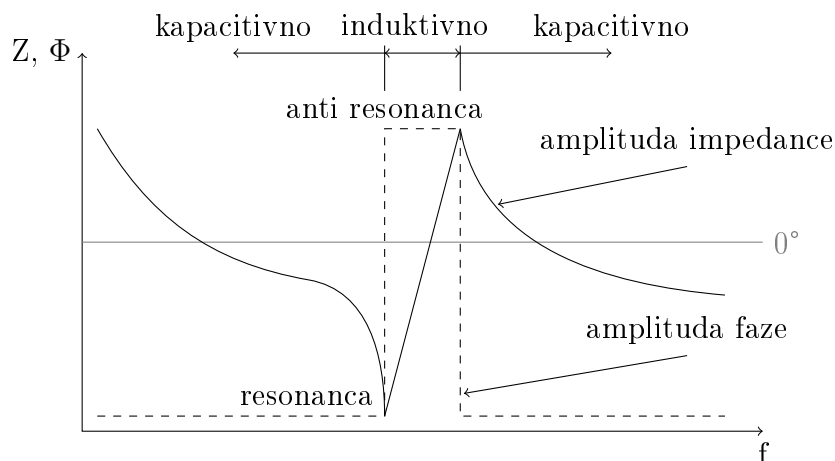
Slika 2.7: Razširjen Butterworth-Van Dyke model.

Čimbolj se amplituda impedance oddajnika v frekvenčnem področju zniža ob resonančni frekvenci, tem več energije se pretvori v ultrazvočno valovanje. Med vsemi resonančnimi frekvencami oddajnika dosežemo najnižjo amplitudo impedance oddajnika samo pri eni od njih. Ta frekvenca je glavna resonančna frekvenca oddajnika.

2.2.2 Modeliranje piezoelektričnega oddajnika

Ker ultrazvočni oddajnik za svoje delovanje potrebuje relativno visoko napetost moramo želeni signal napetostno ojačati. To naredimo z namenskim vezjem za ojačanje signala. Če hočemo oddajati signal s frekvenco 350 kHz, potrebujemo oddajnik, ki bi bil sposoben oddajati pri tej frekvenci, oziroma bo imel pri tej frekvenci glavno resonančno frekvenco. Vsi modeli oddajnikov temeljijo na vzpo-

rednih in zaporednih vezavah upornosti, induktivnosti ali kapacitivnosti. Zaradi različnih vrednosti elementov modela oddajnika imajo resonančno frekvenco pri različnih frekvencah. Kljub temu pa si lahko ogledamo splošen potek impedančne karakteristike v odvisnosti od frekvence. Karakteristika je prikazana na sliki ??.

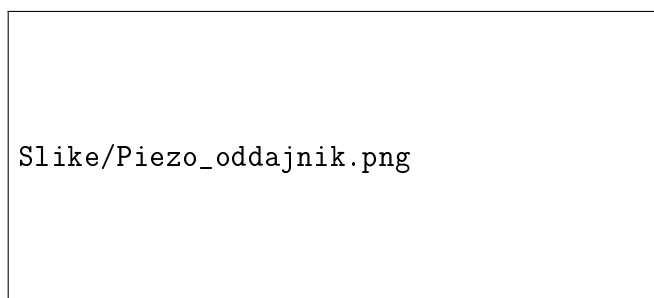


Slika 2.8: Električna karakteristika ultrazvočnega oddajnika.

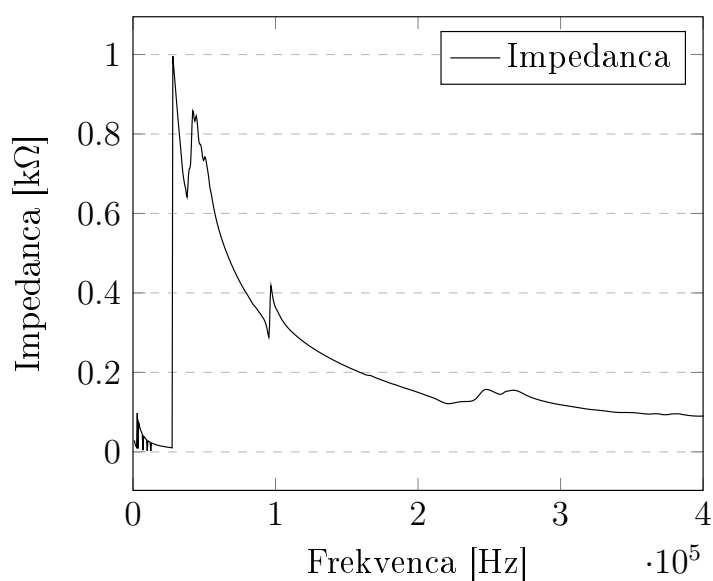
Na grafu na sliki ?? je poleg impedančne karakteristike prikazan tudi fazna karakteristika. Resonanca nastane tam, kjer je impedanca oddajnika najmanjša, antiresonanca pa tam, kjer je amplituda impedance največja. Zanimivo je, da se pri resonančni frekvenci faza obrne, prav tako se obrne tudi, ko nastopi antiresonanca. Tu se zastavlja vprašanje, zakaj sploh želimo, da oddajnik deluje pri resonančni frekvenci. Preprosto zato, ker je pri resonanci impedanca oddajnika najmanjša in je prenos energije iz vhoda na izhod največji.

Teoretične domneve sem preizkusil na testnem modelu piezoelektričnega oddajnika, ki je prikazan na sliki ?? . Za meritev sem uporabil LCR meter (1920 Precision LCR Meter, podjetja QuadTech). Z LCR metrom sem izmeril impedanco in fazni kot v frekvenčnem območju od 1 kHz do 500 kHz s korakom 1 kHz. Impedančna karakteristika oddajnika je prikazana na sliki ??, fazna karakteristika pa na sliki ??.

Iz impedančne karakteristike na sliki ?? vidimo, da ima oddajnik več reso-



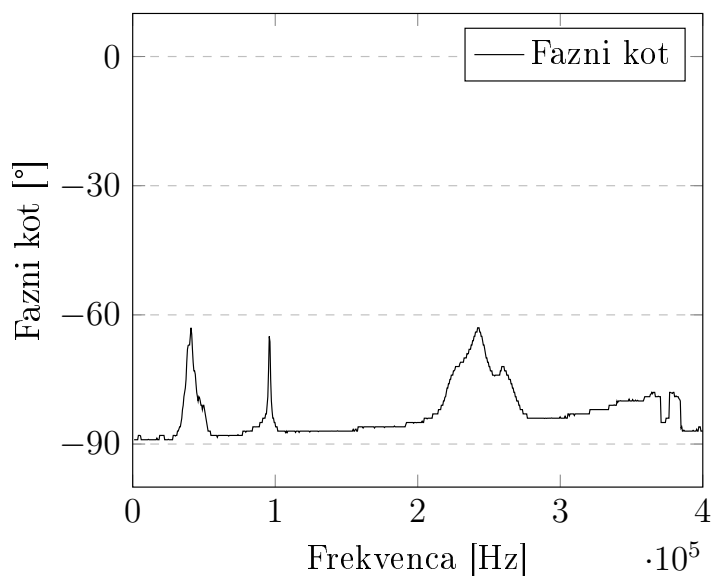
Slika 2.9: Slika uporabljenega piezo oddajnika.



Slika 2.10: Impedančna karakteristika piezoelektričnega oddajnika.

nančnih frekvenc, glavna pa je pri frekvenci 27 kHz. Podobno velja pri opazovanju faznega kota oddajnika.

Fazni kot je negativen, kar pomeni, da ima oddajnik kapacitiven karakter. Iz slike ?? opazimo, da je sprememba faznega kota pri vsaki resonanci. Po teoriji naj bi se fazni kot spremenil iz kapacitivnega karakterja v induktivnega in, ko oddajnik doseže antiresonanco (glej sliko ??), naj bi ponovno spremenil svoj značaj. Pri obravnavanem oddajniku ni povsem tako, je pa opazna sprememba faznega kota pri vseh resonancah. Te nastopijo pri frekvencah: 27 kHz, 95 kHz in 240 kHz. Za prenos moči na izhod so resonance ključnega pomena.



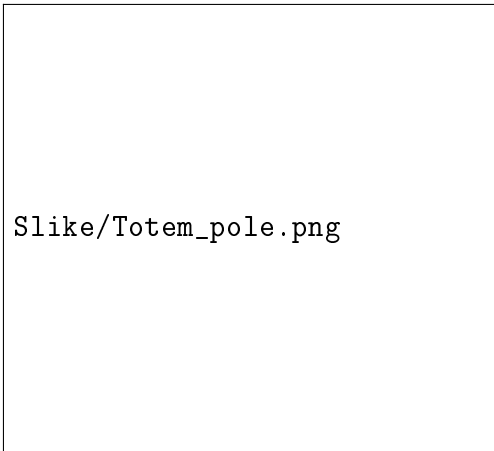
Slika 2.11: Fazna karakteristika piezoelektričnega oddajnika.

2.3 Topologije vezij ultrazvočnih ojačevalnikov

V poglavju bodo predstavljene topologije ultrazvočnih ojačevalnikov, ki se uporabljajo za ojačanje signala v ultrazvočnem področju.

2.3.1 DC/DC pretvornik navzgor

Najpogostejša topologija za dvig (ojačanje) napetosti je DC/DC pretvornik navzgor z dvema stikaloma v totem-pole vezavi. To je vezava dveh tranzistorjev v mostič, polmostič, da se izognemo popačenjem, ki bi sicer nastala zaradi prešibkega vira napajanja. Shema vezave prikazuje slika ???. Za generiranje pulzov visoke napetosti na ultrazvočnem oddajniku moramo pravilno vklapljati in izklapljeti stikali $S1$ in $S2$, za kar skrbi krmilno vezje. Stikali ne smeta biti vključeni istočasno, saj bi v tem primeru bila visoka napetost direktno povezana z ozemljitvijo. Tovrstno krmiljenje je problematično zaradi prisotnosti visoke napetosti na tranzistorjih, zato potrebujemo dodatno vezje za prilagoditev nivoja napetosti. Poleg tega potrebujemo tranzistorje, ki so sposobni preklapljanja pri visokih



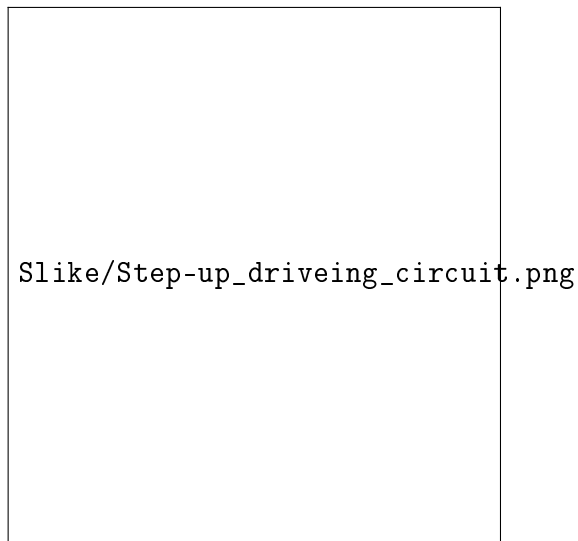
Slike/Totem_pole.png

Slika 2.12: Totem pole krmilno vezje.

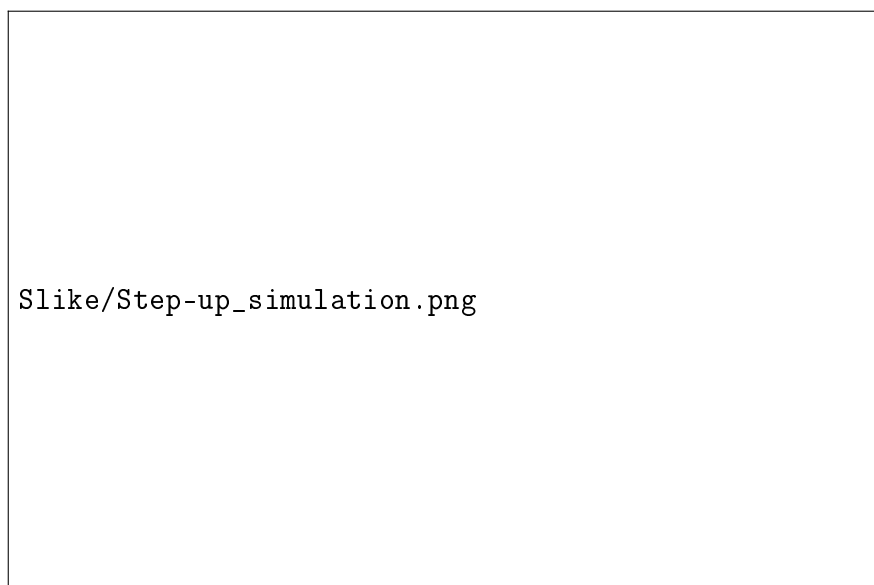
frekvencah. Obstaja kar nekaj integriranih vezij, ki lahko krmilijo hitro preklopjanje tranzistorjev. Slabosti tovrstnih vezij so visoka cena, elektromagnetne motnje (EMI), DC/DC pretvornika in relativno veliko vezje [?].

2.3.2 Direktni pretvornik navzgor

Naslednja možnost za generiranje pulzov visoke napetosti na ultrazvočnem oddajniku je uporaba direktnega pretvornika navzgor (step-up DC/DC converter) prikazan na sliki ???. Razlika s pretvornikom, opisanim v poglavju ??, je v tem, da se tu shranjena energija izmenja s parazitno kapacitivnostjo C_0 . Napetost na ultrazvočnem oddajniku je odvisna od oblike napetostnega pulza in vklopnega razmerja stikal (duty cycle), induktivnosti L in hitrosti vklopljanja stikal $S1$ ter $S2$. Ko je stikalo $S1$ vključeno, vključimo stikalo $S2$ še za toliko časa, da magnetno napolnimo tuljavo L_1 . Po nekaj časa izklopimo stikalo $S2$, kar povzroči tokovno špico na tuljavi L_1 . Ta špica preko diode D_1 napolni parazitno kapacitivnost oddajnika C_0 . Ko se ta cikel večkrat ponovi, se na parazitni kapacitivnosti oddajnika C_0 pojavi zahtevana napetost. Za razbremenitev oddajnika razklenemo stikali $S1$ in $S2$, stikalo $S3$ pa sklenemo. Ob tej poziciji stikal je oddajnik v nedelujočem stanju [?]. Za boljšo predstavo poteka napetosti si oglejmo diagram na sliki ???. Glavna prednost tovrstne topologije vezja je enostavnost. EMI se po-



Slika 2.13: Step-up topologija pretvornika.

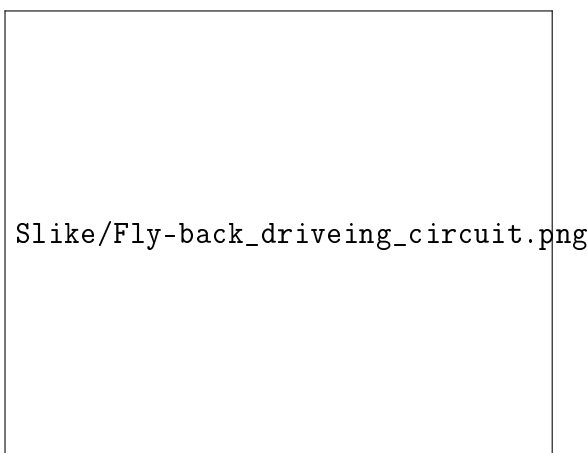


Slika 2.14: Simulacija Step-up topologije pretvornika.

javijo samo ob pozitivnem pulzu. Slabost vezave je krmiljenje izhodne napetosti, saj je zahtevno, ker je izhodna napetost odvisna od frekvence preklapljanja stikal. Za izhodno napetost želene frekvence potrebujemo stikala, ki bodo preklapljanja hitreje od te frekvence, kar pomeni, da je potrebno izdelati zahtevnejše krmilno vezje [?].

2.3.3 Flyback pretvornik

Tretja topologija vezja za napajanje ultrazvočnega ojačevalnika je vezje z DC/DC Flyback pretvornikom, ki je prikazano na sliki ???. Glavna slabost vezja je sekun-

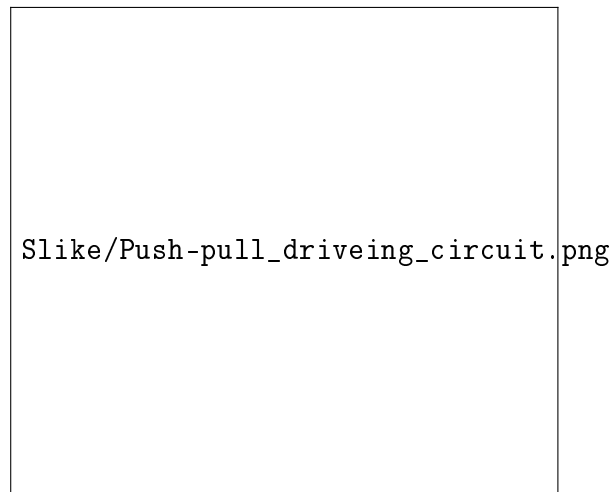


Slika 2.15: Flyback topologija pretvornika.

darno navitje, ki povzroča resonanco s parazitno kapacitivnostjo oddajnika C_0 . Ta resonanca povzroča oscilacije, ko je stikalo $S1$ razklenjeno.

2.3.4 Push-pull topologija vezja

Naslednja topologija vezja uporablja push-pull vezavo in transformator s sredinskim odcepom na primarni strani. Shema vezave je vidna na sliki ???. Ta vezava je podobna vezavi Flyback. Uporabljeni sta dve stikali, ki se izmenično vklapljata in izklapljata. Na začetku sta obe stikali razklenjeni. Stikalo $S1$ se vključi za polovico preklopne periode. V trenutku, ko se izključi, se vključi stikalo $S2$. Tako vklapljanje in izklapljanje dveh stikal je relativno enostavno za izvedbo, cenovno ugodno, ne prihaja do velikih izgub in ne povzroča neželenega šuma.



Slika 2.16: Push-pull topologija pretvornika.

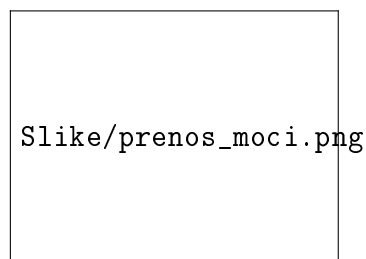
2.4 Teorem o maksimalnem prenosu moči

Pri vezjih, povezanih s prenosom moči, je zelo pomembno poznavanje osnovnih principov prenosa moči. Teorem o maksimalnem prenosu moči govori o pogojih, ki morajo biti izpolnjeni, da bo vir oddajal bremenu največ moči. Teorem pravi:

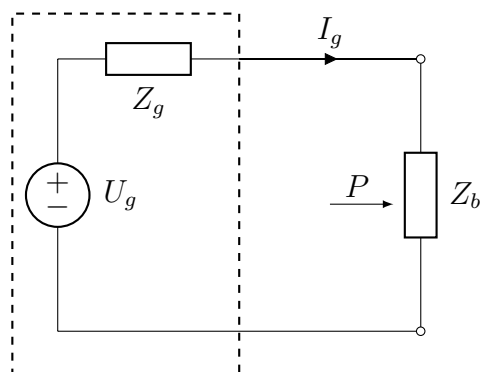
Delovna moč, ki jo daje aktivni dvopol z notranjo impedanco Z_g v breme Z_b je največja, ko velja

$$\boxed{Z_b = Z_g^*} \quad (2.15)$$

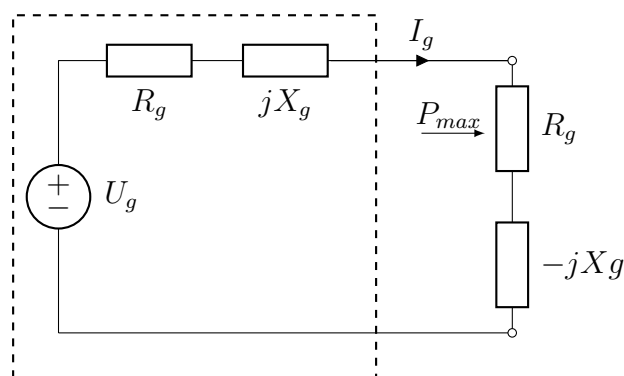
Ta pogoj se imenuje prilagoditev bremena na generatorju. Pove nam kako najbolje izkoristiti dani aktivni dvopol, ki se ga modelira s Théveninovim ekvivalentnim nadomestnim virom [?].



Slika 2.17: Neodvisni viri in linearni elementi kot črna škatla.



Slika 2.18: Impedanca zaporednega RCL nihajnega kroga.



Slika 2.19: Impedanca zaporednega RCL nihajnega kroga - ločen realni in imaginarni del.

Izenačitev realnih delov impedanca dvopola in bremena se imenuje ohmska prilagoditev. Izenačitev reaktanc z nasprotnima predznakoma pa je uglasitev. Če se beseda prilagoditev uporablja v zvezi s poljubnimi imitancami bremena in generatorja, potem se ta nanaša na izpolnitev kompleksne enačbe ?? v celoti, torej pomeni tako prilagoditev ohmskih komponent kot tudi uglasitev [?]. Veljavnost teorema se preveri tako, da se poišče maksimum funkcije, ki predstavlja delovno moč na bremenu v odvisnosti od parametrov bremena. Delovna moč na bremenu je

$$P = \frac{|I_g|^2 R_b}{2} = \frac{|U_g|^2}{2} \frac{R_b}{(R_g + R_b)^2 + (X_g + X_b)^2} \quad (2.16)$$

Maksimum moči pri spreminjanju X_b je očiten,

$$X_b = -X_g \quad . \quad (2.17)$$

Tedaj je delovna moč

$$P = \frac{|U_g|^2}{2} \frac{R_b}{(R_g + R_b)^2} \quad . \quad (2.18)$$

To moč optimiramo še glede na upornost R_b ,

$$\frac{\partial P(R_b)}{\partial R_b} = 0 \quad (2.19)$$

in dobimo pogoj

$$R_b = R_g \quad . \quad (2.20)$$

Prepričali bi se seveda lahko, da je pri tem pogoju drugi odvod enačbe ?? negativen, da je zagotovljen maksimum in ne morda minimum. Če enačbi ?? in ?? združimo dobimo enačbo ??

$$Z_b = R_g - jX_g = Z_g^* \quad . \quad (2.21)$$

Ko je ta pogoj izpolnjen, oddaja vir v breme največjo moč, ki se imenuje razpoložljiva moč P_0 , ki je predstavljena v enačbi ??.

$$\boxed{P_0 = \frac{|U_g|^2}{8R_g}} \quad . \quad (2.22)$$

Pri izpeljavi teorema lahko izhaja tudi iz Nortonovega dvopola in dobimo teorem v njegovi dualni formulaciji, ki zahteva za maksimalen prenos moči

$$\boxed{Y_b = Y_g^*} \quad . \quad (2.23)$$

Sedaj za razpoložljivo moč velja

$$\boxed{P_0 = \frac{|I_g|^2}{8G_g}} \quad . \quad (2.24)$$

Včasih se zgodi, da je spremenljivo breme čisto ohmsko. S takim bremenom teorema o maksimalni moči ni mogoče povsem izpolniti. Napačno bi sklepali, da je optimalna obremenitev pri $R_b = R_g$, da torej izpolnimo tisti del pogoja, ki ga

pač lahko. Če ponovno izračunamo maksimum moči pri pogoju, da je $X_b = 0$, dobimo nov pogoj

$$\boxed{R_b = |Z_g|} \quad . \quad (2.25)$$

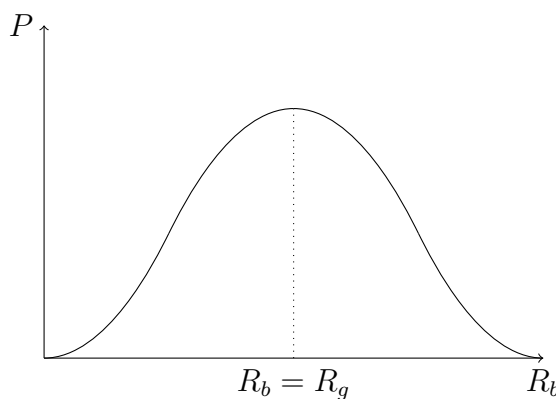
Tako izbrano ohmsko breme zagotavlja optimalne razmere, ko je reaktanca bremena $X_b = 0$. Drug poseben primer nastopi, ko uporovni del bremena ni spremenljiv, je pa reaktiven. Takrat dosežemo optimalne razmere pri uglastitvi tokokroga. Seveda pa je v obeh primerih prenešana moč manjša od razpoložljive.

Bremena največkrat ne moremo poljubno spreminjati. Takrat za izpolnitev pogoja za maksimalni prenos moči poskrbimo z dodatnim vezjem, ki ga vstavimo med breme in generator. Takemu vezju pravimo prilagodilno vezje [?].

Iz elektrotehniškega vidika velja, da je delovna moč bremena vedno manjša ali enaka od razpoložljive moči, to je

$$P_b \leq P_0 \quad , \quad (2.26)$$

in sta moči enaki le pri prilagojenem bremenu. Navidezna moč $|S_b|$ je vedno večja od delovne moči P_b . Kar je prikazano na grafu na sliki ??.



Slika 2.20: Graf maksimalnega prenaša moči iz generatorja na breme.

2.5 Resonanca

Splošno je odziv električnega vezja v izmeničnem stanju odvisen od frekvenca vzbujanja. Pri nekaterih frekvencah imamo lahko maksimume, tedaj pravimo, da je vezje v resonanci. Resonanca je pojav, ki ga opažamo pri harmoničnih nihanjih tudi v mehaniki in akustičnih sistemih. V električnih vezjih naredi dogajanje pestro in slikovito in nudi veliko možnosti za izvedbo različnih sistemskih funkcij vezja.

Resonančna frekvenca je frekvenca vzbujanja, pri kateri doseže odziv vezja maksimum. Ni nujno, da ima vezje samo eno resonančno frekvenco, temveč jih ima lahko več. Glede na izbran odziv ločimo med tokovo in napetostno resonanco. Že pri preprostih vezjih se pokaže, da je računanje maksimumov odziva lahko zamudno in nepregledno. Delo si olajšamo tako, da iščemo resonančne frekvence dvopola z naslednjim približnim kriterijem.

Pri resonančnih frekvencah je vhodna imitanca dvopola realna, kjer sta frekvenci 0 Hz in neskončno izvzeti.

Z računskega vidika je ta kriterij enostavnejši kot iskanje ekstremov. Ti se pri računanju kazalcev nanašajo na absolutne vrednosti, torej na amplitude tokov in napetosti.

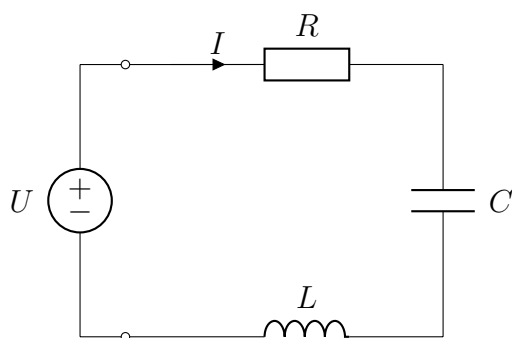
V nadaljevanju si oglejmo primer izračuna resonančne frekvence in frekvenčnega poteka impedance zaporednega nihajnega kroga. Zaporedno RCL vezje je prikazano na sliki ??, na sliki ?? pa kazalčni diagrami RCL vezav pr različnih razmerjih frekvenc.

Impedanca zaporednega nihajnega kroga je

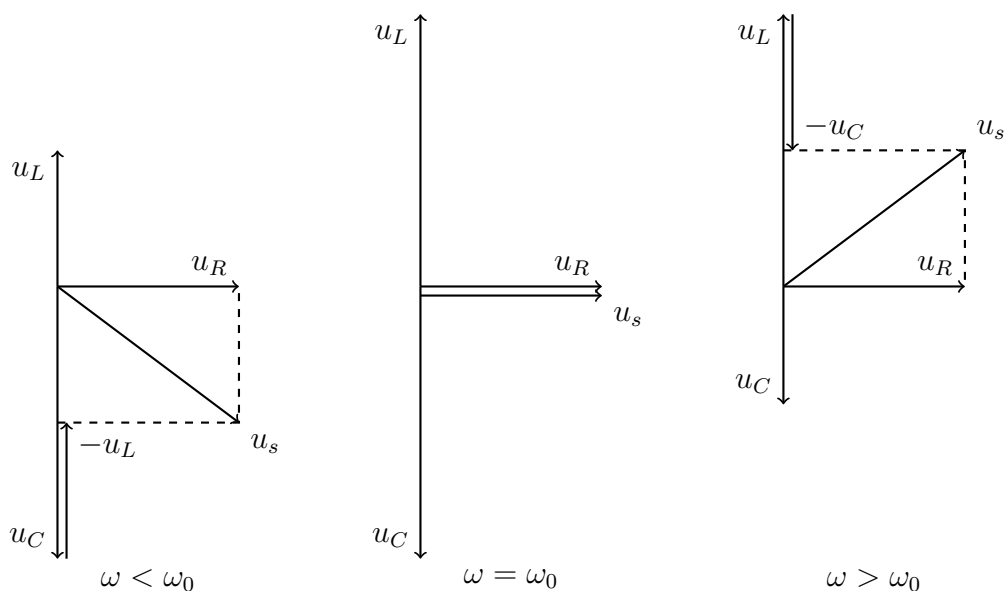
$$Z(j\omega) = R + j(\omega L - \frac{1}{j\omega C}) = |Z(j\omega)|e^{j\phi(\omega)}, \quad (2.27)$$

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}, \quad (2.28)$$

$$\phi(\omega) = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (2.29)$$



Slika 2.21: Impedanca zaporednega RCL nihajnega kroga



Slika 2.22: Kazalčni diagrami RCL nihajnega kroga

Absolutna vrednost toka je

$$|I| = \frac{|U|}{|Z(j\omega)|} = \frac{|U|}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (2.30)$$

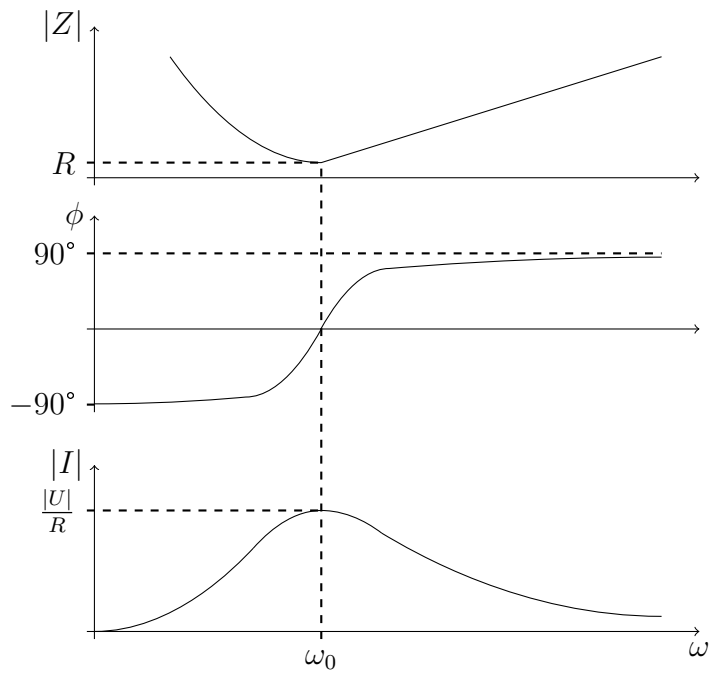
Pogoj za resonanco

$$\text{Im}[Z(j\omega)] = 0 \quad (2.31)$$

pomeni tudi maksimum toka $|I|$. Opravka imamo s tokovo resonanco. Iz tega pogoja sledi resonančna frekvenca ω_0 ,

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

Frekvenčni poteki absolutne vrednosti in kota impedance ter amplitude toka so prikazani na sliki ??.

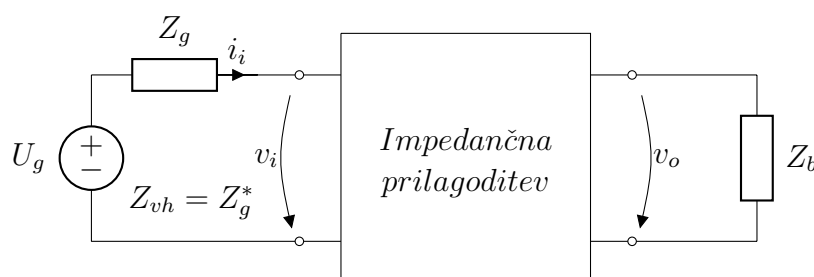


Slika 2.23: Razmere v zaporednem nihajnem krogu

Krivulja značilne oblike, ki ponazarja frekvenčni potek odziva v okolici resonance, imenujemo resonančna frekvenca [?].

2.6 Impedančno prilagajanje

Ko se pričnemo ukvarjati z vezji pri višjih frekvencah, kot sta na primer ultrazvok in radijski signali ugotovimo, da je impedančna prilagoditev bremena za vir (ali obratno) bistvenega pomena za optimalno delovanje naprave [?]. Impedančno prilagoditev lahko obravnavamo iz vidika priključnih sponk kot črno škatlo, kjer nas ne zanima kaj je v njej (slika ??).



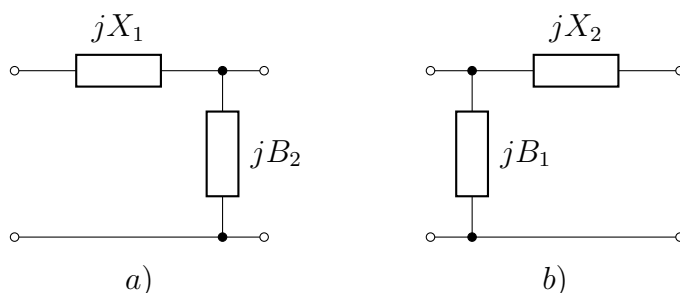
Slika 2.24: Prilagoditev bremena na generator s prilagoditvenim vezjem.

S stališča inženirskega načrtovanja vezij in sistemov je impedančno prilagajanje pogost in pomemben postopek, ko med breme in signalni vir (ki ga modeliramo s Théveninovim ekvivalentnim dvopolom), vstavimo dvovhodno prilagodilno vezje, katera naloga je transformacija impedance bremena tako, da na sponkah aktivnega dvopola velja pogoj za maksimalni prenos moči iz generatorja,

$$\boxed{Z_{vh} = Z_g^*} \quad . \quad (2.33)$$

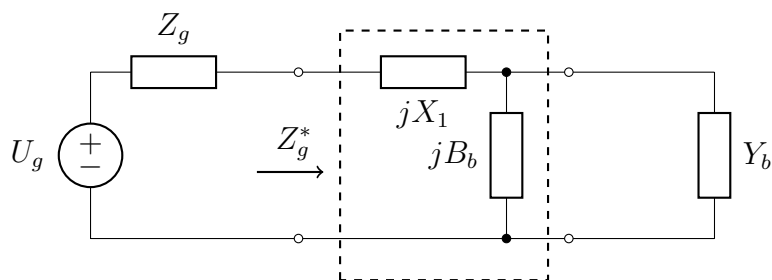
Namen prilagajanja bremena je optimalno izkoriščanje razpoložljive moči signalnega vira. Dosežemo ga le, če pri opravljanju te naloge prilagodilno vezje zase ne porablja energije. Prilagodilna vezja so zato čista reaktivna ali LC vezja. V takem primeru bo razpoložljiva moč generatorja tudi moč na bremenu [?].

V nadaljevanju sta predstavljeni dve prilagodilni vezji in rešitev problema impedančnega prilagajanja pri eni frekvenci. Predstavljena bosta dve enostavni vezji, ki ji glede na obliko grafa imenujemo dvovhodno vezje (četveropol) L in nastopa v dveh konfiguracijah na sliki ?? . Vsaj z enim od obeh vezij lahko prilaga-



Slika 2.25: Prilagodilni reaktivni vezji L oblike.

godimo poljubno breme na poljubno impedanco vira. Poglejmo podrobneje vezje (a) na sliki ?? in izračunajmo elemente tako, da bo transformirana impedanca bremena zavzela konjugirano vrednost impedance vira. Rešimo problem anali-



Slika 2.26: Prilagodilni reaktivni vezji.

tično. Izpolnjen mora biti pogoj za maksimalni prenos moči, zato za vhodno impedanco vezja na sliki ?? velja enačba ??.

$$Z_g^* = Z_{vh} \quad , \quad Z_g = R_g + jX_g \quad , \quad Y_b = G_b + jB_b \quad , \quad (2.34)$$

$$R_g - jX_g = jX_1 + \frac{1}{G_b + j(B_2 + B_b)} \quad . \quad (2.35)$$

Kompleksna enačba razpade na dve realni,

$$R_g = \frac{1}{G_b^2 + (B_2 + B_b)^2} \quad , \quad (2.36)$$

$$X_g + X_1 = \frac{B_2 + B_b}{G_b^2 + (B_2 + B_b)^2} \quad . \quad (2.37)$$

Iz prve napetosti sledi

$$B_2 = \pm \sqrt{\frac{G_b}{R_g}(1 - G_b R_g - B_b)} . \quad (2.38)$$

Izračunamo $B_2 + B_b$, vstavimo v enačbo ?? in dobimo še

$$X_1 = \pm \sqrt{\frac{R_g}{G_b}(1 - G_b R_g - X_g)} . \quad (2.39)$$

Rešitvi sta torej splošno dve. izbiramo para z enakima predznakoma pri korenih. Pogoji za realno rešitev pa je

$$G_b R_g \leq 1 . \quad (2.40)$$

Če pogoj v enačbi ?? ni izpolnjen, se odločimo za drugo obliko vezja L, ki je predstavljen na sliki ??b. Vezji sta si zelo podobni, razlika je v tem, da sedaj pri izračunu uporabimo admitance Y namesto impedanc Z . V prilagodilnem vezju najprej nastopa susceptanca jB paralelno in nato reaktanca jX serijsko. Izračun je podoben izračunu predstavljenemu zgoraj. Če pa ugotovimo, da je vezje v splošnem dualno prejšnjemu, lahko rešitvi iz zgornjih izračunov kar priredimo in dobimo [?]

$$X_2 = \pm \sqrt{\frac{R_b}{G_g}(1 - R_b X_g - B_b)} \quad (2.41)$$

$$B_1 = \pm \sqrt{\frac{G_g}{B_b}(1 - R_b G_g - B_g)} . \quad (2.42)$$

Uporabnost te konfiguracije pa je omejena z dualnim pogojem

$$R_b G_g \leq 1 . \quad (2.43)$$

Kot je opisano je impedančna prilagoditev zelo pomembna za maksimalen prenos moči, vendar pa ni to edini razlog za impedančno prilagajanje. Z impedančno prilagoditvijo vplivamo tudi na zmanjšanje nivoja šuma pri krmiljenju napetosti ojačevalnika [?]. Nivo šuma lahko podamo z enačbo ??

$$F = F_{min} + \frac{R_n}{F_g} |Y_s - Y_{s,opt}|^2 . \quad (2.44)$$

Parametri R_n , F_g in $Y_{s,opt}$ so lastnosti ojačevalnika v delovni točki. Šum je minimiziran, ko je impedanca napajanja enaka $Y_{s,opt}$. Torej, naslednja funkcija prilagoditve je izvedba te transformacije. V modernejših integriranih vezjih imamo možnost nadzora nad fizičnimi dimenzijami tranzistorjev, zato izberemo tranzistorje velikosti, ki bodo izbrani optimalno, da bo šum čim manjši in da dosežemo zahtevano ojačanje vezja.

Impedančna prilagoditev vpliva tudi na dosego minimalnih odbojev pri oddajanju.

Vplivamo tudi na izkoristek naprave. Lahko imamo napravo prilagojeno za maksimalen prenos moči, kot je opisano v poglavju ??, a nimamo prilagojenega na maksimalni izkoristek, zato je potrebno vedno iskati določene kompromise za dosego optimalnega izkoristka. Da vidimo ta opažanja lahko zapišemo enačbo izkoristka (enačba ??)

$$\eta = \frac{P_L}{P_{dc}} = \frac{\frac{1}{2}v_0i_0}{I_QV_{sup}} \quad . \quad (2.45)$$

Kjer je I_q povprečen tok napajalnega vira V_{sup} v enem ciklu, v_0 in i_0 pa sta trenutni vrednosti izhodne napetosti in toka ojačevalnika. Enačbo ?? zapišemo v sledeči obliki

$$\eta = \frac{1}{2}\hat{I}\hat{V} \quad . \quad (2.46)$$

Kjer je $\hat{I} = i_0/I_Q$ vršna vrednost izmeničnega toka, $\hat{U} = u_0/V_{sup}$ pa vršna vrednost izmenične komponente napetosti. Ob ohranitvi energije velja $\hat{I} \times \hat{V} \leq 2$. Pri ugasnjem ojačevalniku velja, $\hat{V} \leq 1$ in $\hat{I} \leq 2$. Ko so določene te vrednosti za dosego določenega izkoristka, je vrednost impedance izračunljiva z enačbo ??.

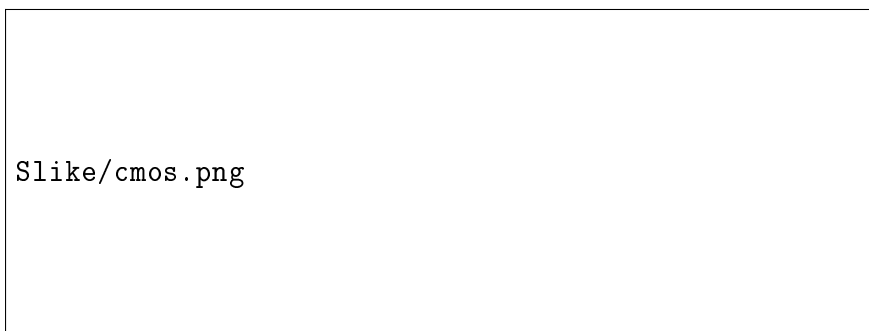
$$R_{L,opt} = \frac{v_0}{i_0} = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} \times \frac{V_{sup}}{I_Q} \quad . \quad (2.47)$$

Poleg prikazanih primerov impedančne prilagoditve obstaja še nekaj drugih metod, ki pa jih na tem mestu ne bomo podrobneje predstavljali. Za podrobnejšo razlago priporočam literaturo [?].

2.7 Krmiljenje MOSFET tranzistorjev

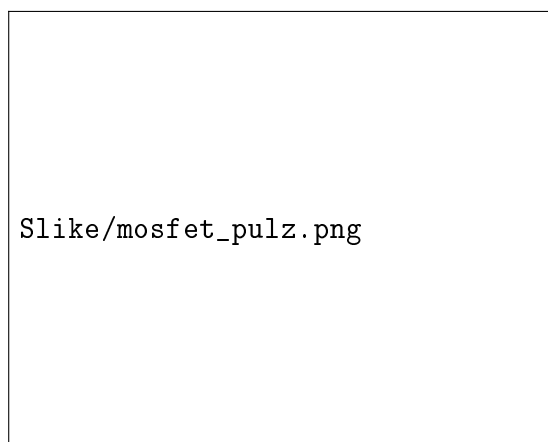
Močnostni polprevodniški element, kot sta IGBT (insulated-gate bipolar transistor) in mosfet tranzistor, tvorita s pripadajočim prožilnim vezjem zaključeno enoto t.j. močnostno stikalo, ki predstavlja vez med krmilno elektroniko in energijskim delom pretvornika [?]. Na tem mestu se ne bomo spuščali podrobneje v samo delovanje in zgradbo mosfet tranzistorja, ampak bo predstavljeno krmiljenje mosfet tranzistorja.

Majhna krmilna moč mosfet-a omogoča, da le-tega prožimo kar s pomočjo standardnih (15 V) CMOS (complementary metal–oxide–semiconductor) digitalnih vezij, kot to kaže slika ??/a. Zavedati pa se moramo, da potrebuje mosfet

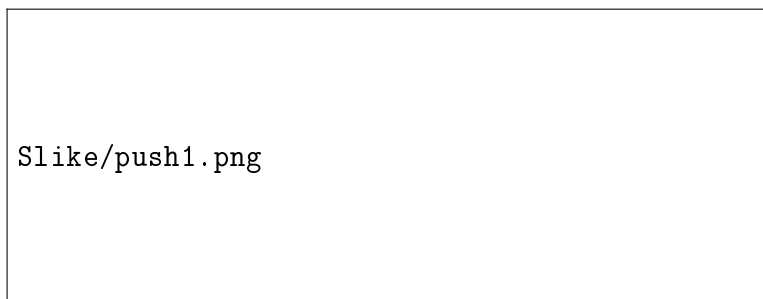


Slika 2.27: CMOS krmiljenje MOSFET tranzistorjev.

za vklop oziroma izklop, kljub temu, da ga prištevamo med napetostno krmiljene elemente, relativno velik tokovni impulz prikazan na sliki ??. Slednjega večina kombinacijskih CMOS vezij ni sposobna generirati, zato uporabljamo za proženje raje t.i. driver-je oziroma buffer-je, ki jih pogosto vežemo vzporedno, da povečamo tokovno zmogljivost krmilnega impulza (slika ??/b) [?]. Kjer tokovna zmogljivost takšnih prožilnih vezij kljub temu ne ustreza, ali je neustrezna njihova odpornost na elektromagnetne motnje, potem uporabljamo prožilna vezja zgrajena iz diskretnih elementov. Za njih je značilna izhodna stopnja, ki je skoraj vedno zgrajena v t.i. push-pull vezavi iz dveh komplementarnih bipolarnih ali mosfet tranzistorjev.

Slika 2.28: Karakterističen potek U_{GS} (U_{GE}) in I_G .

Push-pull vezava zagotavlja namreč majhno upornost, ko prevaja zgornji tranzistor, kot tudi, ko prevaja spodnji, s čimer preprečimo nastanek naključnih vklopov zaradi du/dt efekta. Pri dimenzioniranju diskretnega prožilnega vezja pa ne smemo prezreti možnega nastanka kratkotrajnih kratkostičnih tokov skozi komplementarni par tranzistorjev, ki lahko stečejo ob vsakokratnem prehodu krmilnega pulza, zaradi nezadostne amplitudne rezerve krmilnih napetosti obeh tranzistorjev, ki povzroči sočasno kratkotrajno prevajanje. Omenjeni pojav lahko deloma omejimo s prožilnim vezjem, kjer je upor R_G v krmilnem tokokrogu, s katerim določamo hitrost preklopov, nadomeščen z uporoma $R_{G(ON)}$ in $R_{G(OFF)}$, ki sta vezane v serijo z emitorjema komplementarnih tranzistorjev (slika ??). Slednje omogoča neodvisno določitev preklopnih hitrosti vklopa in izklopa tranzistorja.



Slika 2.29: Omejevanje krmilnega toka v vrata mosfet tranzistorja.

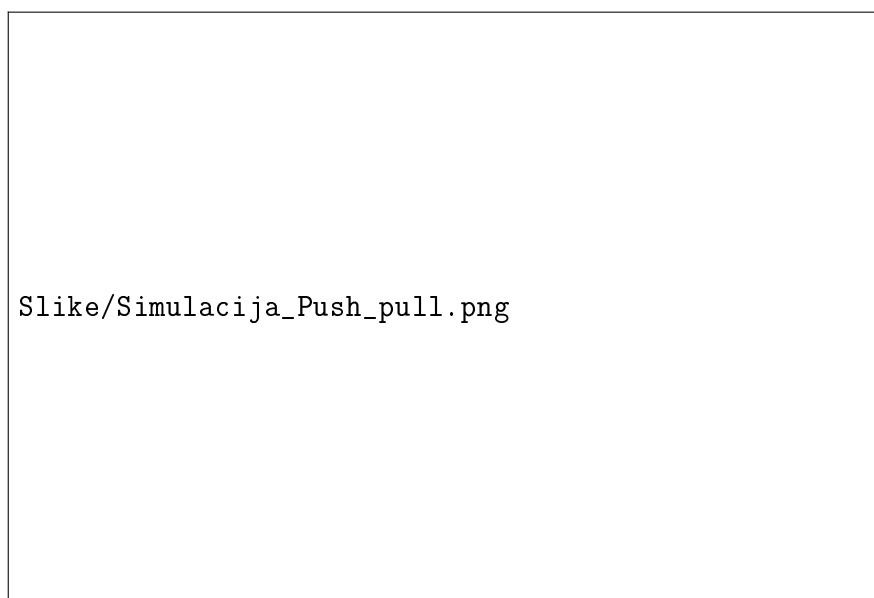
3 Simulacija vezja

3.1 Uvod

Pred pričetkom načrtovanja tiskanega vezja sem uporabil simulacijski program, s katerim sem testiral in preveril delovanje vezja. Za načrtovanje, testiranje delovanja in odpravljanje pomanjkljivosti vezja sem si pomagal s simulacijskimi programi za testiranje električnih vezij. Uporabil sem študentski verziji programa PSpice in LTspice, ki sta pri načrtovalcih vezij precej popularna. Seveda obstaja še veliko drugih simulacijskih programov, ki jih lahko uporabimo, a zaradi nekaterih prednosti, ki jih ponujata, sem se odločil za njuno uporabo. Testiral sem delovanje več različnih topologij vezij in ugotavljal prednosti ter pomanjkljivosti posameznih topologij. Od obravnavanih se je najbolje obnesla topologija vezja s transformatorjem v push-pull izvedbi.

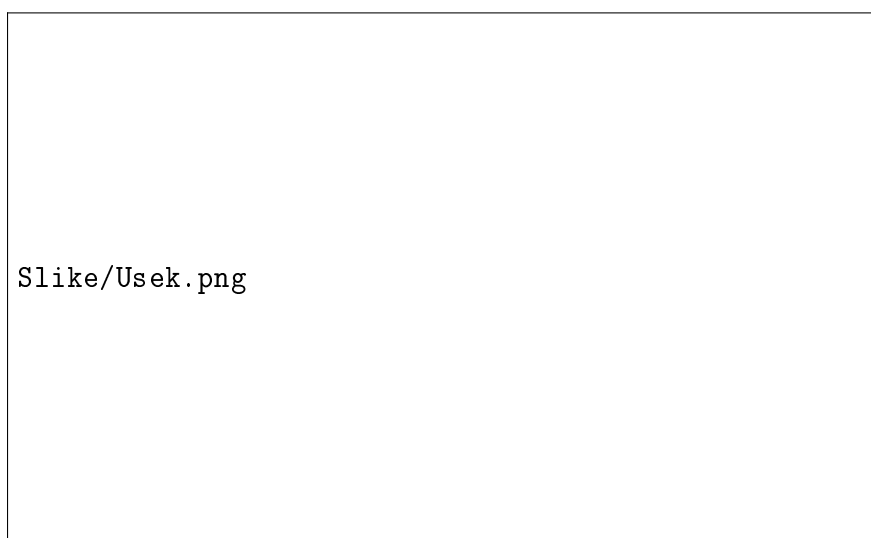
3.2 Push-pull vezje

Simulacijska shema push-pull pretvornika, ki je prikazana na sliki ??, ima kar nekaj prednosti pred ostalimi topologijami pretvornikov.



Slika 3.1: Simulacijsko vezje push-pull pretvornika.

Vežje vsebuje dva sinusna generatorja, ki predstavljata fazno zamaknjen signal frekvence 350 kHz. Signal gre na vrata (gate) mosfet tranzistorjev, ki izmenično odpirata in zapirata prevodno pot med izvorom (source) in ponorom (drain). Izmenično krmiljenje tranzistorjev je pomembno, da dobimo na sekundarni strani transformatorja izmenično napetost. Ko je prevodno polariziran zgornji tranzistor, se na sekundarno stran transformira pozitivni polval napetosti, ko prevaja spodnji tranzistor pa se na sekundarno stran transformira negativni polval napetosti. Izmenično napetost sestavljamo iz enosmernega vira, ki se transformira na sekundarno napetost transformatorja. Potek sekundarne napetosti je prikazan na sliki ???. Vršna vrednost napetosti znaša skoraj 800 V, kar je tudi ena izmed



Slika 3.2: Potek sekundarne napetosti transformatorja.

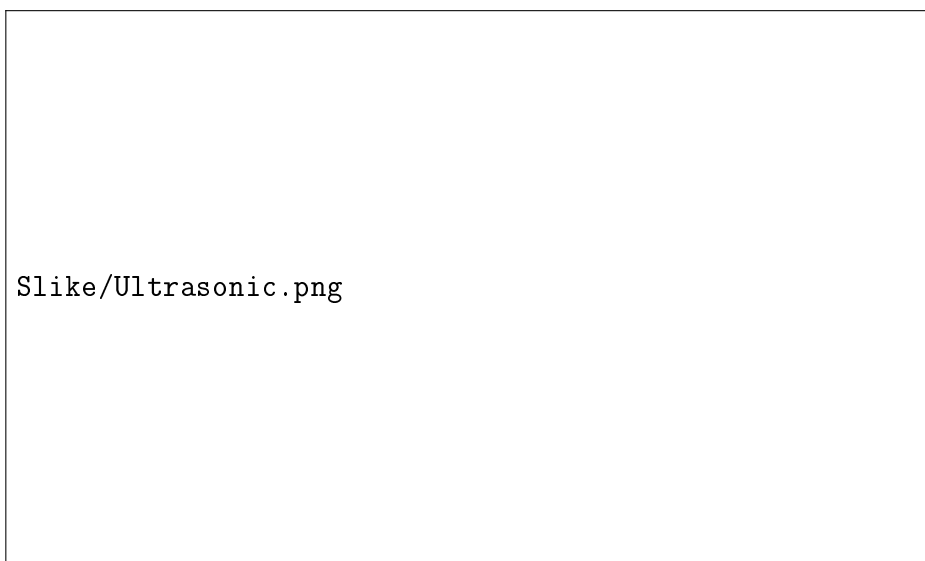
zahtev ojačevalnika, saj zaradi relativno velike impedance oddajnika potrebujemo visoko napetost za zadosten prenos moči. Oblika napetosti ni popolnoma sinusna, ker se generira iz enosmerne napetosti 25 V. Če bi tranzistorje prožili s signalom pravokotne oblike, bi zmanjšali motnje ob preklopu iz pozitivne v negativno pol-periodo. S tem bi dobili signal, ki bi bil bolj podoben sinusnemu poteku. Tok na izhodu je po obliki enak napetosti in doseže 2 A vršne vrednosti.

Za impedančno prilagajanje je najpomembnejši element v vezju transforma-

tor. Na impedanco vplivamo z odvzemanjem ali dodajanjem primarnih in sekundarnih ovojev in z izbiro jedra transformatorja.

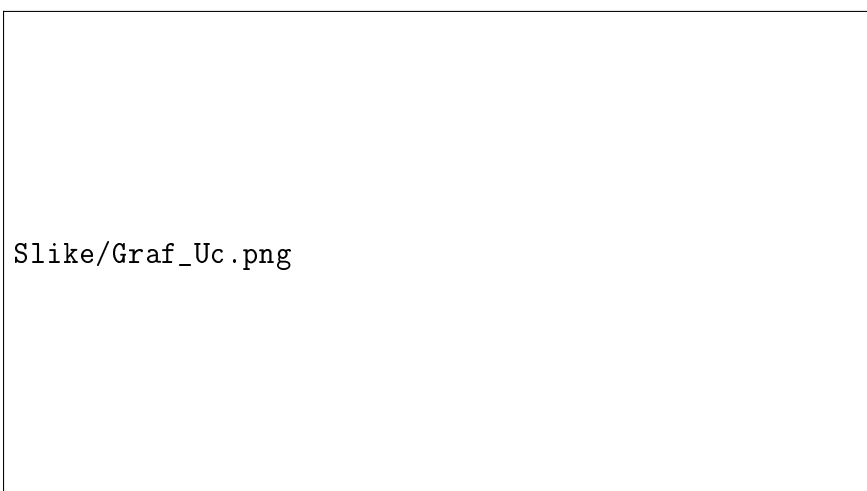
3.3 Primer resonančnega vezja

Kot eksperiment sem testiral tudi vezje, ki se uporablja za ultrazvočno masažo mišic. Vezje je bilo predstavljeno v brošuri Piezoelectric Ceramics Japonskega proizvajalca Fuji ceramics corporation. S testiranjem vezja sem želel ugotoviti ali je vezje primerno za napajanje ultrazvočnega oddajnika. Predvsem me je zanimalo, ali je z vezjem možno dobaviti dovolj energije, da bo ultrazvočni oddajnik oddajal signal ustrezne oblike in moči. Vezje je sicer namenjeno delovanju pri frekvenci 1 MHz. Simulacijska shema je prikazana na sliki ???. Iz sheme si najprej



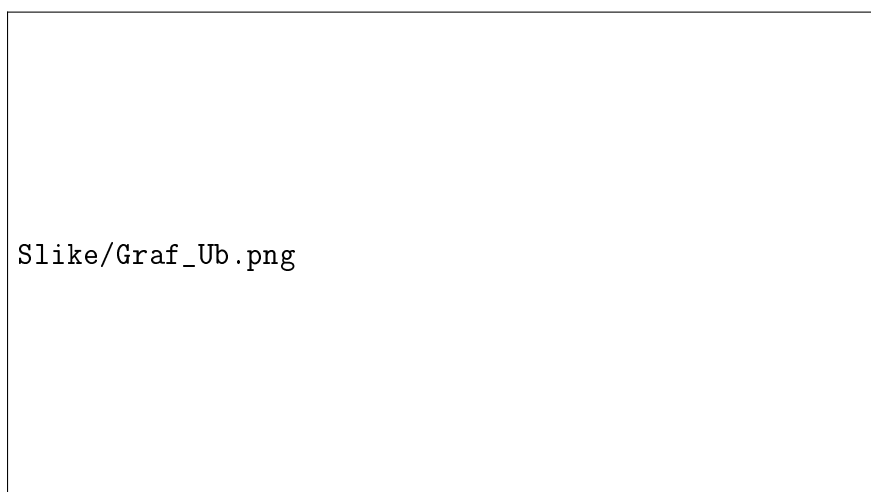
Slika 3.3: Simulacijsko vezje za ultrazvočno masažo.

oglejmo napetost na kolektorju NPN tranzistorja Q_1 in tok skozi tuljavo L_2 . Iz potekov, prikazanih na sliki ?? opazimo, da je napetost na kolektorju tranzistorja Q_1 nazobčena in da traja kar nekaj časa, da se v vezju izzveni prehodni pojav. Po prehodnem pojavu vidimo, da napetost niha okrog napajalne napetosti. To pomeni, da je skoraj vsa napajalna napetost enaka napetosti med kolektorjem in



Slika 3.4: Kolektorska napetost tranzistorja Q_1 in tok na tuljavi L_1 .

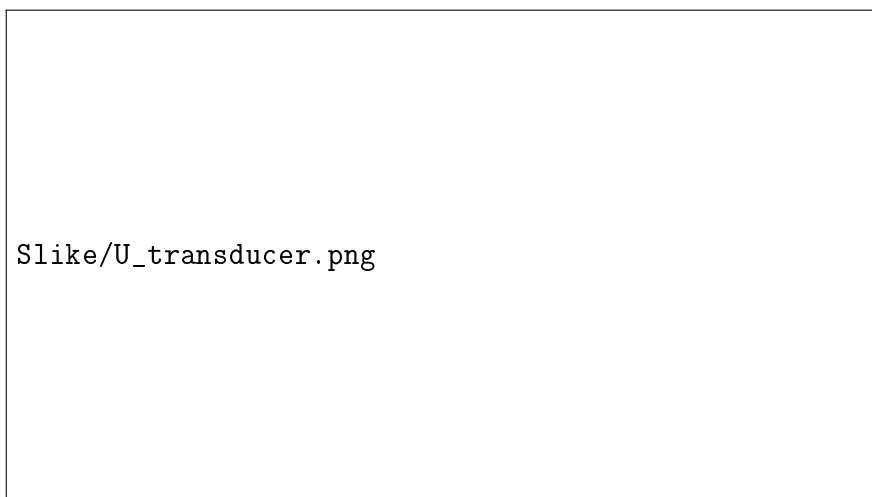
emitorjem tranzistorja Q_1 U_{CE} . Tok skozi tuljavo L_2 je podobne oblike kot napetost, le da prehiteva za določen kot. Ideja vezja je, da se vezje samo "ujame" pri frekvenci, na katero je ultrazvočni oddajnik dimenzioniran. Ultrazvočni oddajnik je modeliran s kondenzatorjem C_4 . Slika ?? prikazuje napetost in tok na tranzi-



Slika 3.5: Kolektorska napetost na tranzistorju Q_1 in tok na tuljavi L_1 .

stor Q_1 . Napetost niha okrog vrednosti 900 mV, tok pa okrog 1,4 mA. Oba se po določenem času ustalita na tej vrednosti. Pri simulaciji sem bil presenečen nad relativno majhno napetostjo in tokom skozi ultrazvočni oddajnik, saj sem

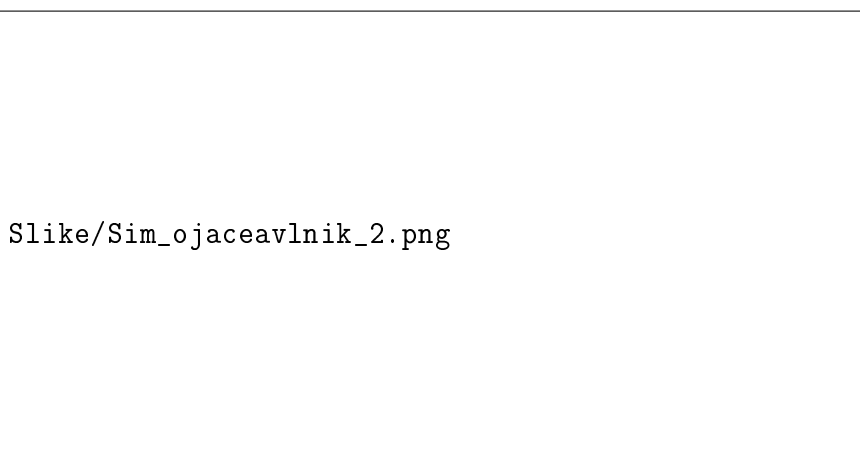
pričakoval večjo moč na izhodu ojačevalnika. Napetost in tok skozi oddajnik sta prikazana na sliki ??.



Slika 3.6: Kolektorska napetost na tranzistorju Q_1 in tok na tuljavi L_1 .

3.4 Ojačevalnik v AB razredu ojačanja

Tretji primer simulacije je ojačevalnik v AB razredu, kar pomeni, da se gibljemo po delovni premici, da se izognemo prenosnemu popačenju, ki nastane zaradi nelinearne karakteristike bipolarnih tranzistorjev. Zato sem izbral topologijo vezja z dvema diodama na izhodni strani operacijskega ojačevalnika. Operacijski ojačevalnik je namenjen ojačanju nizkonapetostnega signala z izhoda merilne kartice Red Pitaya. Signal se ojači s faktorjem R_3 proti R_1 , kar v opisanem primeru znaša 10, ker sem izbral upora $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ in $R_3 = 10\text{ k}\Omega$. Namen simulacije je ugotoviti, ali je ojačevalnik v AB razredu sposoben zagotoviti ustrezno napetost za napajanje ultrazvočnega oddajnika frekvenc od 100 kHz do 500 kHz. Shema simulacije je bila narejena v programu LTspice IV in je prikazana na sliki ??.

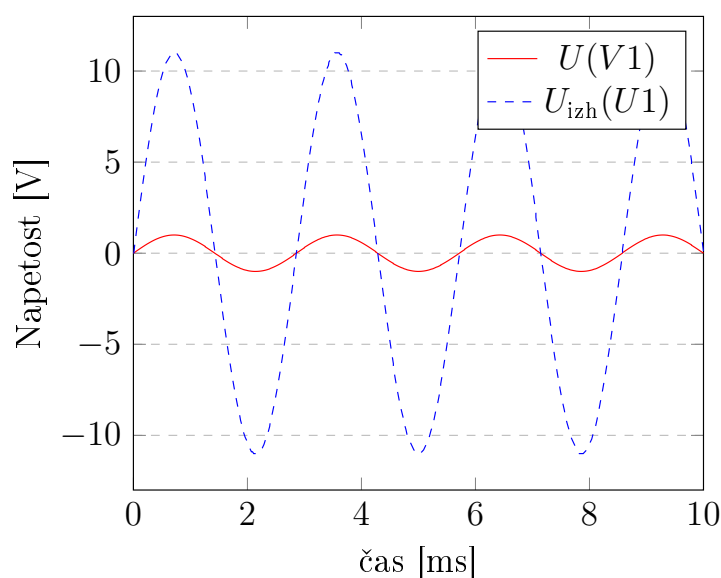


Slika 3.7: Simulacija vezja ojačevalnika v AB razredu ojačanja.

3.4.1 Opis delovanja

Napajanje vezja je simetrično +24 V in -24 V. Signal iz Red Pitaye predstavlja sinusni generator, ki mu lahko poljubno spreminjamo amplitudo, frekvenco in še nekatere druge parametre. Signal se nato ojači z razmerjem uporov R_3 proti R_1 na neinvertirajočem vhodu operacijskega ojačevalnika. V simulacijski shemi je uporabljen operacijski ojačevalnik LT1192, ker ima visoko razmerje strmine signala

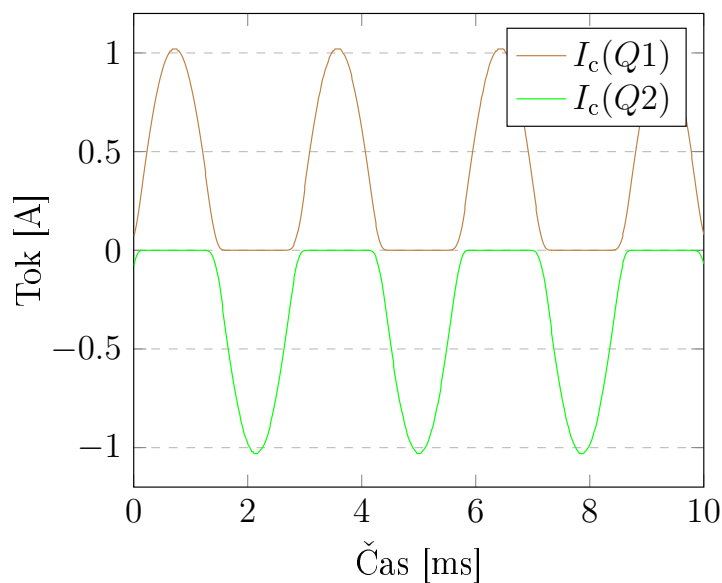
na enoto časa (slew rate) in znaša $450 \text{ V}/\mu$, lahko pa bi uporabili tudi kakšen drug operacijski ojačevalnik s podobnimi lastnostmi. Signala na neinvertirajočem vhodu in izhodu operacijskega ojačevalnika sta prikazana na sliki ??.



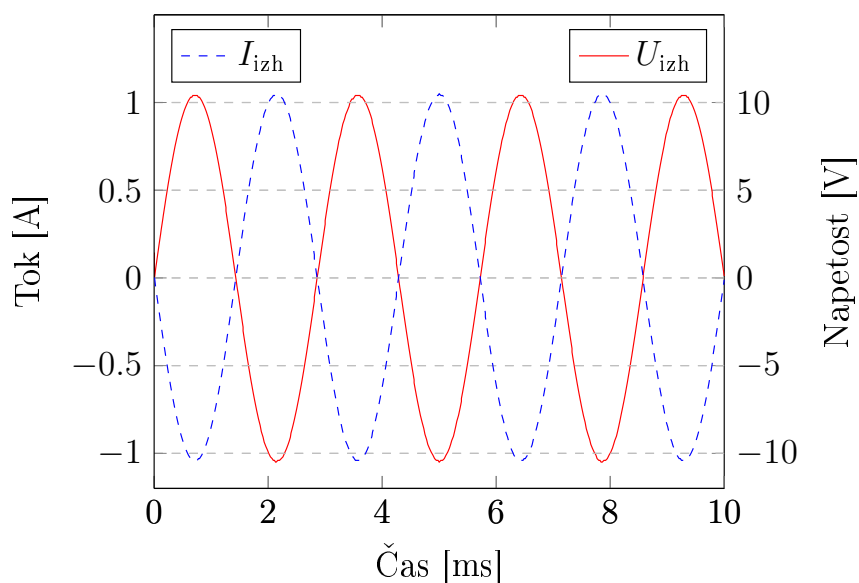
Slika 3.8: Potek vhodnega signala U in izhodnega signala U_{izh} operacijskega ojačevalnika.

Naslednja stopnja ojačevalnika je namenjena tokovnemu ojačanju signala, saj ima uporabljen operacijski ojačevalnik izhodno tokovno zmogljivost le 50 mA , kar je za predviden namen vezja bistveno premalo. Diodi D_1 in D_2 služita kompenzaciji padca napetosti med bazo in emitorjem bipolarnega tranzistorja (U_{BE}). Tok in napetost na diodi nista velika, zato lahko izberemo skoraj katerokoli signalno diodo. Diodi služite za izognitev prenosnemu popačenju zaradi nelinearne statične karakteristike bipolarnega tranzistorja. Upora R_4 in R_5 služita za omejitev baznega toka tranzistorja, s katerima krmilimo kolektorski tok skozi tranzistorja. Poteka kolektorskih tokov obeh tranzistorjev sta prikazan na sliki ??.

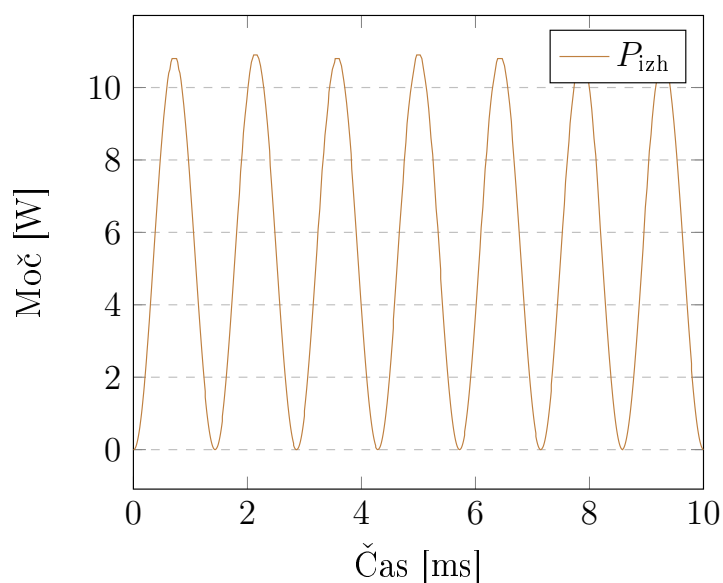
Kot že omenjeno sta na izhodu dva močnostna tranzistorja tipa NPN in PNP. Tranzistorja sta v push-pull vezavi, kar pomeni, da eno polperiodo prevaja prvi, drugo polperiodo pa drugi tranzistor. Bazna upora R_4 in R_5 morata imeti enaki upornosti, da je delovna točka na sredini delovnega področja tranzistorja. Iz-

Slika 3.9: Potek kolektorskih tokov skozi tranzistorja Q_1 in Q_2 .

hodna napetost se odraža kot padec napetosti na uporu R_8 in je prikazana na sliki ?? skupaj s izhodnim tokom, s pomočjo katerega lahko izračunamo moč, ki se troši na uporu R_8 , ki je prikazan na sliki ??.



Slika 3.10: Potek izhodne napetosti in toka.



Slika 3.11: Potek trenutne moči na izhodu ojačevalnika.

Potek trenutne moči na izhodu ima dvakrat višjo frekvenco, kot je frekvenca napetosti in toka, ker je trenutna moč definirana kot produkt trenutnih vrednosti napetosti u in toka i , ki sta definirana z enačbama:

$$u = U_m \cos(\omega t + \alpha_u), \quad (3.1)$$

$$i = I_m \cos(\omega t + \alpha_i), \quad (3.2)$$

ter faznega kota ϕ

$$\phi = \alpha_u - \alpha_i \quad . \quad (3.3)$$

Trenutna moč p bremena določa njun produkt:

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m I_m \cos(\omega t + \alpha_u) \cos(\omega t + \alpha_i) \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m (\cos(\alpha_u + \alpha_i) + \cos(2\omega t + \alpha_u + \alpha_i)) \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \cos\phi + \frac{1}{2} U_m I_m \cos(2\omega t + 2\alpha_u - \phi) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Nas bolj kot trenutna moč zanima delovna oziroma aktivna moč na bremenu. Konstantni del moči splošnega bremena je hkrati tudi srednja oziroma povprečna moč. Izračunamo jo po enačbi ??.

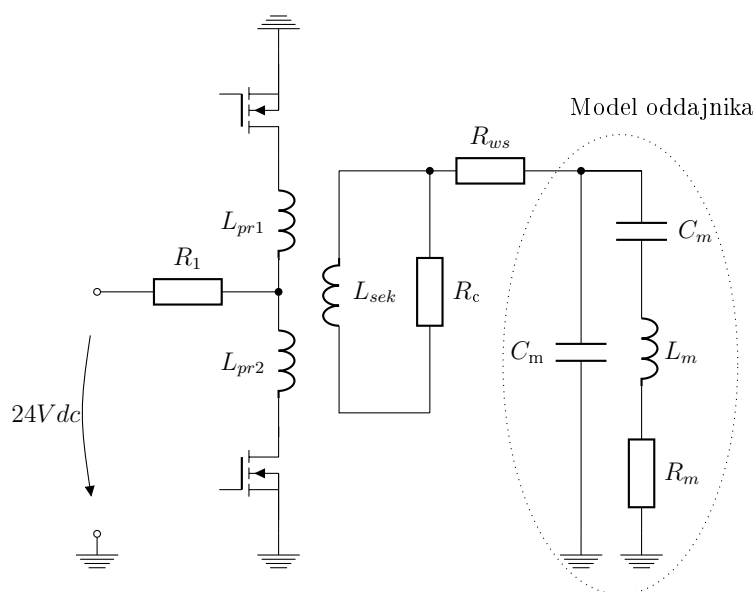
$$P = \frac{1}{2}U_m I_m \cos\phi = U_{\text{ef.}} I_{\text{ef.}} \cos\phi. \quad (3.5)$$

Faktor $\cos\phi$ je faktor delavnosti, ki je razpet med števili 0 in 1, fazni kot ϕ vsakršnega sestavljenega bremena pa med kota -90° in 90° .

3.5 Elementi ultrazvočnega ojačevalnika

3.5.1 Shema vezja

Vezje ultrazvočnega ojačevalnika deluje po principu push-pull pretvornika, ki je opisan v poglavju ???. Vezje je predstavljeno na sliki ???.



Slika 3.12: Osnovna shema push-pull pretvornika.

Shema predstavlja osnovo, na kateri je narejeno vezje. Krmiljenje mosfet tranzistorjev mora biti usklajeno. Izhod vezja oziroma sekundarna stran transformatorja predstavlja napetost sekundarnega navitja, ki jo potrebuje oddajnik za svoje delovanje.

3.5.2 Izbira jedra

Za izvedbo push-pull topologije sem izbral jedro v obliki toroida, na katerega sem navil dva primarna navitja, kar predstavlja induktivnost $8 \mu\text{H}$. Sekundarno navitje ima 6 ovojev, kar predstavlja induktivnost $80 \mu\text{H}$. Toroidno jedro proizvajalca EPCOS sem izbral na podlagi vira [?] z dimenzijami $R16 \times 9,60 \times 6,30$ (mm). Ostali podatki so prikazani v tabeli ???.

Material	A_L nH	μ	Naročniška številka	Magnetne lastnosti			
				$\Sigma l/A$ mm ⁻¹	l_e mm	A_e mm ²	V_e mm ³
N30	2270 ± 25 %	4300	BL64290-L45-X830	1,95	38,52	19,73	760

Tabela 3.1: Podatki izbranega toroidnega jedra z oznako B64290-L45.

Število ovojev primarnih in sekundarnega navitja sem izračunal z znanimi enačbami za določanje števila ovojev navitij. Za izračun induktivnosti sem uporabil enačbo ??.

$$L = A_L \cdot N^2 \quad , \quad (3.6)$$

kjer L predstavlja induktivnost navitja, A_L faktor induktivnosti (dejansko je $A_L = 1/R_m$, kjer R_m predstavlja magnetno upornost jedra), N pa predstavlja število ovojev navitja.

Iz enačbe ?? izrazimo število ovojev, da dobimo enačbo ??.

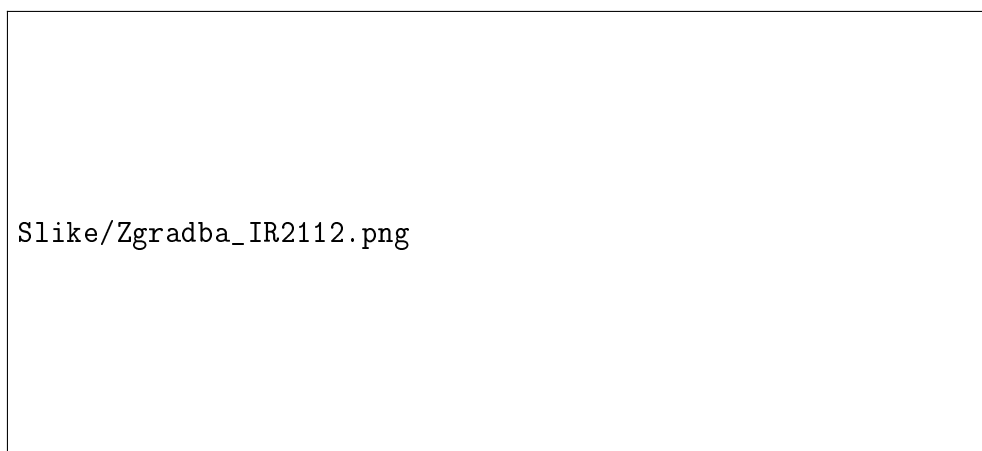
$$N_{pri} = \sqrt{\frac{L_1}{A_L}} = 1,877 \doteq 2 \text{ ovoja} \quad . \quad (3.7)$$

Podobno izračunamo število ovojev za sekundarno navitje.

$$N_{sek} = \sqrt{\frac{L_2}{A_L}} = 5,936 \doteq 6 \text{ ovojev} \quad . \quad (3.8)$$

3.5.3 Krmiljenje vrat mosfet tranzistorjev

Za krmiljenje vrat mosfet tranzistorjev IRF510 sem uporabil namensko integrirano vezje IR2112 podjetja International Rectifier. Njegova značilnost je, da uporablja totem-pole vezavo. Namenjen je krmiljenju mosfet tranzistorjev, ker lahko preko krmilnih vrat steče kratkotrajen a precej velik tok ob vklopu in izklopu tranzistorja. Funkcijski blok integriranega vezja IR2112 je prikazan na sliki ?? . Poleg integriranega vezja IR2112 se signal, preden gre na vhoda H_{IN} in L_{IN} ojačil na ustrezen napetostni nivo z operacijskim ojačevalnikom. Ker pri push-pull vezavi vklapljammo tranzistorja izmenično, se signal na enem vhodu invertira z vezavo invertirajočega ojačevalnika.



Slika 3.13: Funkcijski blok diagram integriranega vezja IR2112.

Za krmiljenje vrat mosfet tranzistorjev se lahko uporabljajo tudi druga integrirana vezja, ki so primerna za tovrstno uporabo. Zelo primerno se je izkazalo integrirano vezje UC3706 podjetja Texas Instruments, ki ima možnost obračanja faze že vgrajeno v samem integriranem vezju, kar še poenostavi shemo ojačevalnika.

3.5.4 Generiranje vhodnega signala z merilno kartico Red Pitayo

Za generiranje vhodnega signala sem uporabil merilno kartico Red Pitaya. Sistem je narejena na tiskanem vezju malo večjem od kreditne kartice in je nadomestljiv z dragimi laboratorijskimi instrumenti. Signal sem generiral s pomočjo funkcije, napisane v Matlab-u. V klicu funkcije je definiran kanal, na katerem generiramo signal, amplituda signala, frekvenca ultrazvočnega signala in frekvenca signala, ki služi za vklopjanje pulzov. Ta signal ima frekvenco 2 kHz. Signal vklopimo 10 krat, kar pomeni, da pošljemo vlak desetih pulzov. Seveda lahko vse parametre tudi spreminjamo in prilagajamo željam uporabnikov.

Del kode, v kateri se generira signal, je predstavljen v nadaljevanju.

```
int main(int argc, char **argv){
    int i;
    /* Print error, if rp_Init() function failed */
    if(rp_Init() != RP_OK){
        fprintf(stderr, "Rp api init failed!\n");
    }

    rp_GenFreq(RP_CH_1, 350000);
    rp_GenAmp(RP_CH_1, 1.0);
    rp_GenWaveform(RP_CH_1, RP_WAVEFORM_SINE);

    /* Enable output channel */
    rp_GenOutEnable(RP_CH_1);

    for(i = 0; i < 11; i++){
        usleep(500);
        rp_GenBurstCount(RP_CH_1, 30);
        usleep(500);
        rp_GenMode(RP_CH_1, RP_GEN_MODE_BURST);
    }

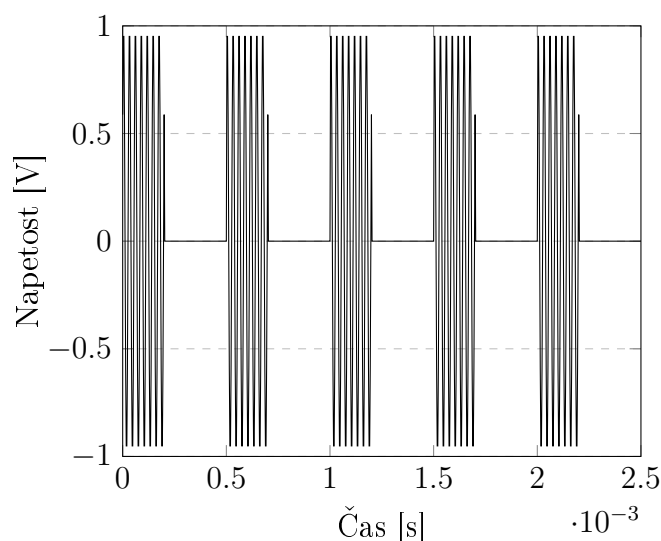
    /* Release rp resources */
    rp_Release();

    return 0;
}
```

Koda v aplikaciji je napisana s pomočjo API (application program interface) ukazov, ki se izvajajo v zanki `main`, kjer najprej preverimo, če ima Red Pitaya internetno povezavo in če je naprava pod napetostjo. Signal se nato generira z nastavljivo frekvenco, amplitudo, kanalom in obliko signala. Potem omogočimo

izhodni kanal za generiranje signala in generiramo signal. Signal je sestavljen iz časa, ko je vrednost signala 0 V in ko je na izhodu sinusna napetost. Ko se zanka `for` izvede, se na izhodu prikaže signal. Signal se generira samo enkrat. Primer je napisan s fiksnimi vrednostmi, končna aplikacija pa bo imela možnost spreminjanja vrednosti in generiranja poljubnega signala.

Signal lahko generiramo tudi s pomočjo matlaba. V matlabu potrebujemo SCPI ukaze, za kar pa moramo predhodno naložiti SCPI strežnik na SD kartico Red Pitaye. Signal generiran v Matlabu je prikazan na sliki ??.



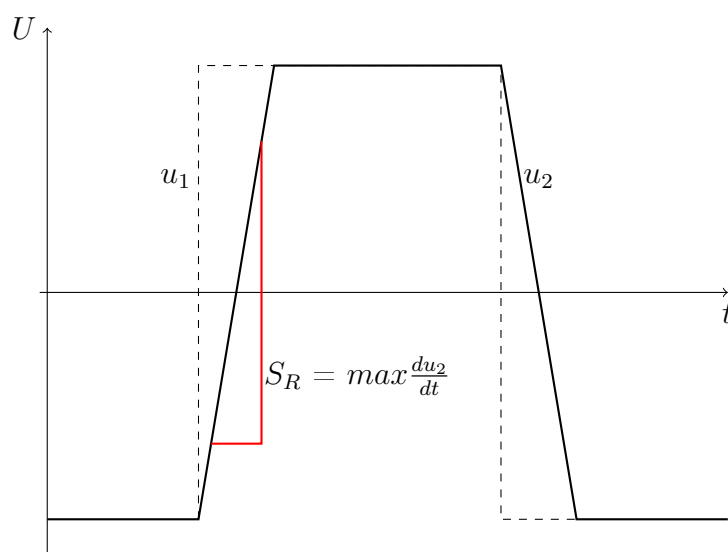
Slika 3.14: Signal generiran v matlab-u.

3.5.5 Problem uporabljenih operacijskih ojačevalnikov

Pri načrtovanju krmiljenja mosfet tranzistorjev sem uporabil invertirajoči ojačevalnik, ki sem ga realiziral s pomočjo operacijskega ojačevalnika v DIP (dual in-line package) ohišju. Težave je povzročal počasen odziv izhoda integriranega vezja oziroma slew rate. Oglejmo si definicijo:

$$SR = \max \left(\left| \frac{dv_{\text{out}}(t)}{dt} \right| \right) \quad (3.9)$$

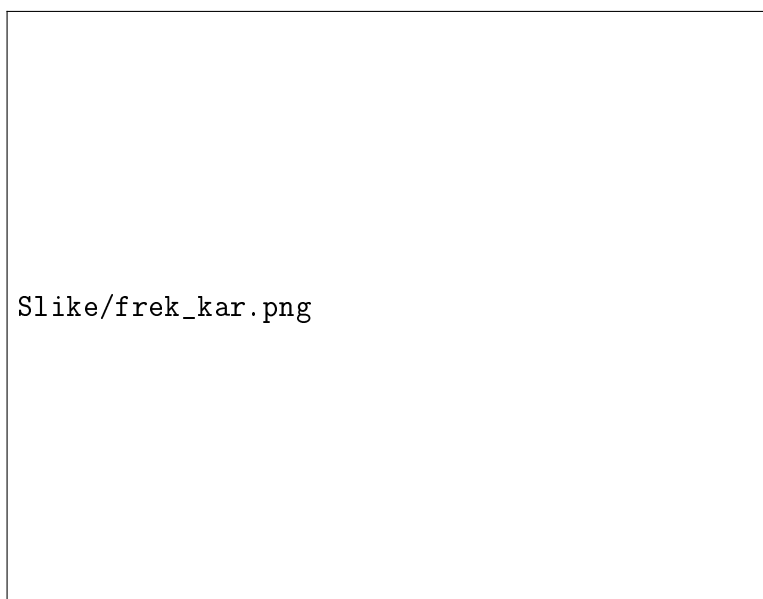
Slew rate oziroma maksimalna strmina izhodne napetosti operacijskega ojačevalnika je definirana kot maksimalna sprememba izhodne napetostjo v časovni enoti in je izražena v V/s . Na sliki ??, kjer vidimo pravokotni pulz napetosti u_1 in izhodno napetost u_2 . Z odebeljeno (rdečo) črto je označeno kako dobimo slew rate iz oscilograma.



Slika 3.15: Prikaz slew rate-a. Vhodna napetost (u_1) in izhodna napetost (u_2) [?].

Operacijski ojačevalniki tipa LM101A, LM107, LM108A, LM112, LM118 in LM741 imajo frekvenčno karakteristiko zelo podobno, kot je prikazana na sliki ??.

Karakteristika predstavlja odvisnost napetostnega ojačanja od frekvence. Polna črta predstavlja odprtozančno ojačanje, prekinjana črta pa zaprtozančno ojačanje pri ojačanju 100. Pri napetostnem ojačanju 40 dB (kar predstavlja 100 krat večjo izhodno napetost v primerjavi z vhodno) izhodna napetost verno sledi vhodni do frekvence 10 kHz. Bolj ko dvigujemo frekvenco, večje je popačenje izhodnega signala oziroma višje kot gremo po frekvenčni karakteristiki, manjše ojačanje lahko dosežemo, da še zagotovimo obliko signala brez popačenja. Razlog omejitve slew rate-a tiči v kompenzacijski kapacitivnosti znotraj operacijskega ojačevalnika oziroma omejitve vhodnega toka ojačevalnika. Manjši kot je tok ojačevalnika, boljši slew rate dosežemo. Za izhodni signal napetosti, ki gre skozi



Slika 3.16: Napetostno ojačanje operacijskega ojačevalnika v odvisnosti od frekvence.

0 lahko zapišemo naslednjo enačbo:

$$v_0 = V_p \cdot \sin 2\pi f(t) \quad (3.10)$$

Enačbo odvajam po času

$$\frac{dv_0}{dt} = 2\pi f V_{pp} \cos 2\pi f(t) \quad (3.11)$$

$$\left. \frac{dv_0}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi f V_{pp} \quad (3.12)$$

$$S_R = 2\pi f_{max} V_{pp} \quad (3.13)$$

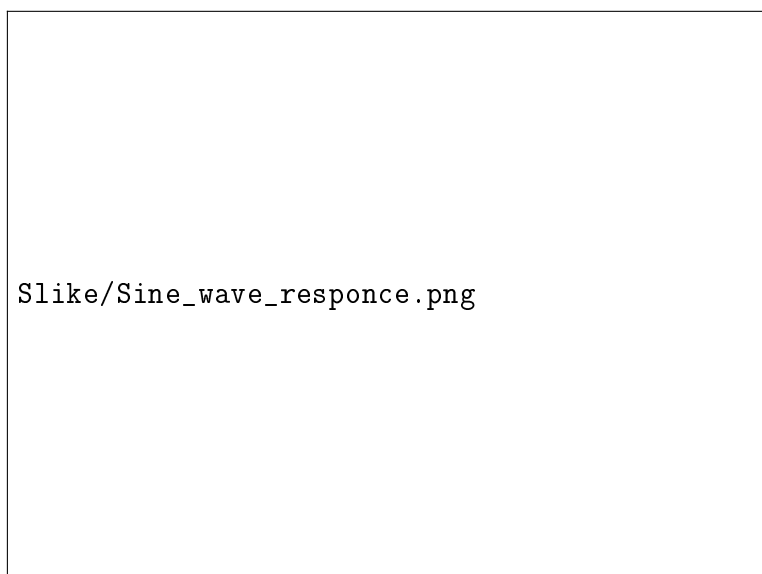
Kjer so:

v_0 - izhodna napetost

v_{pp} - vršna izhodna napetost (peak to peak)

$S_R = \max \frac{dv_0}{dt}$ - slew rate

Po enačbi ?? izračunamo slew rate ali pa enačbo obrnemo in izračunamo izhodno napetost V_{pp} , če imamo podan S_R . Proizvajalec ponavadi podaja diagrame, kjer lahko hitro ocenimo, če bo operacijski ojačevalnik zadostoval našim potrebam glede slew rate-a. Eden takšnih diagramov je podan na sliki ??.



Slika 3.17: Frekvenca izhodna napetosti v odvisnosti od slew rate-a.

Na grafu vidimo odvisnost izhodne napetosti od frekvence in slew rate-a. Višjo kot želimo izhodno napetost, prej pridemo do popačenja signala pri istem slew rate-u. Iz grafa hitro ugotovimo, da izbran operacijski ojačevalnik zadostuje našim zahtevam za delovanje pri višjih frekvencah. Kot primer vzemimo operacijski ojačevalnik LM741 z $S_R = 0.5 V/\mu s$, ima frekvenčni doseg okrog 6 kHz, kar je precej malo, vendar dovolj za vezja, kjer nimamo opravka z visokimi frekvencami. Za vezja pri frekvencah do 1 MHz je bolj primeren operacijski ojačevalnik z oznako LM118, ki ima $S_R = 70 \text{ } \mu V/\mu s$. Njegov frekvenčni doseg je okrog 900 kHz [?].

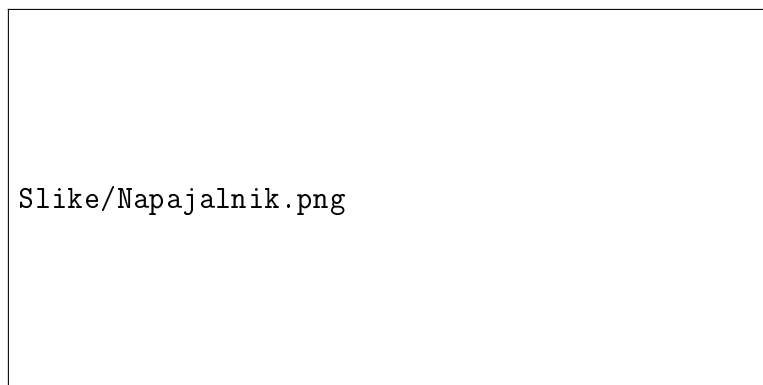
4 Izdelava tiskanega vezja

Tiskano vezje sem izrisal v programu KiCad. Izbral sem ga zato, ker za njegovo uporabo ne potrebujemo licence in z njim brez težav izdelamo tudi zahtevnejša tiskana vezja. Najprej sem narisal shemo vezja v urejevalniku Eeschema, ki je del programa KiCad in je namenjen za risanje shem. Podrobnejši opis sheme je prikazan v nadaljevanju.

4.1 Shema vezja v KiCadu

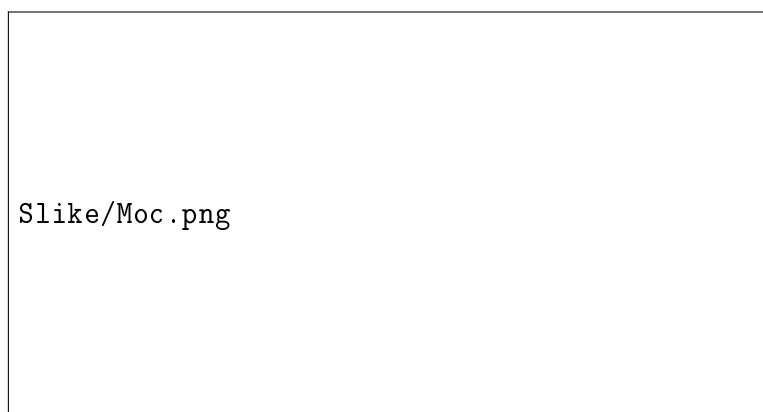
Osnova sheme je push-pull vezava transformatorja in dveh mosfet tranzistorjev, s katerima spreminjamo tok skozi primarni navitji transformatorja. Shema oddajnika je sestavljena iz treh glavnih delov: napajalnika, močnostnega dela in krmilja mosfet tranzistorjev. Ker je napajalni del prilagojen za napajanje operacijskih ojačevalnikov in integriranega vezja IR2112, je bilo potrebno poiskati rešitev kako iz +5 V napajanja, ki ga zagotavlja RedPitaya, dvigniti napetostni nivo na +/-12 V, ki ga potrebujejo za svoje delovanje operacijski ojačevalniki. Problem sem rešil z uporabo DC/DC pretvornika z oznako NMH0512DC, ki pretvarja iz napetosti +5 V na napetostna nivoja +12 V in -12 V. Pretvornik je namenjen namestitvi na tiskano vezje in zagotavlja 2 W moči, kar je dovolj za napajanje uporabljenih integriranih vezij. Tu je potrebno opomniti, da s tem pretvornikom ne napajamo primarnih navitij transformatorja ampak samo integrirana vezja za krmiljenje mosfet tranzistorjev. Shema vezave je prikazana na sliki ??.

Močnostni del vezja je sestavljen iz dveh močnostnih mosfet tranzistorjev, transformatorja s sredinskim odcepom na primarni strani, enosmernega napajalnega vira s spremenljivo napetostjo od 3 V do 20 V in izhoda, ki je povezan na BNC (bayonet neill–concelman) priključek za priklop ultrazvočnega oddajnika. Na sekundarni strani je napetostni delilnik, ki je namenjen opazovanju napetosti na izhodu ojačevalnika. Med izhodno sponko in maso je nizko ohmski upor (shunt), ki je namenjen spremljanju toka na izhodu ojačevalnika. Iz izmerjenega toka in napetosti dobimo impedanco vezja, ki je zelo pomembna iz vidika im-



Slika 4.1: Shema 5 V napajalnega dela za napajanje integriranih vezij.

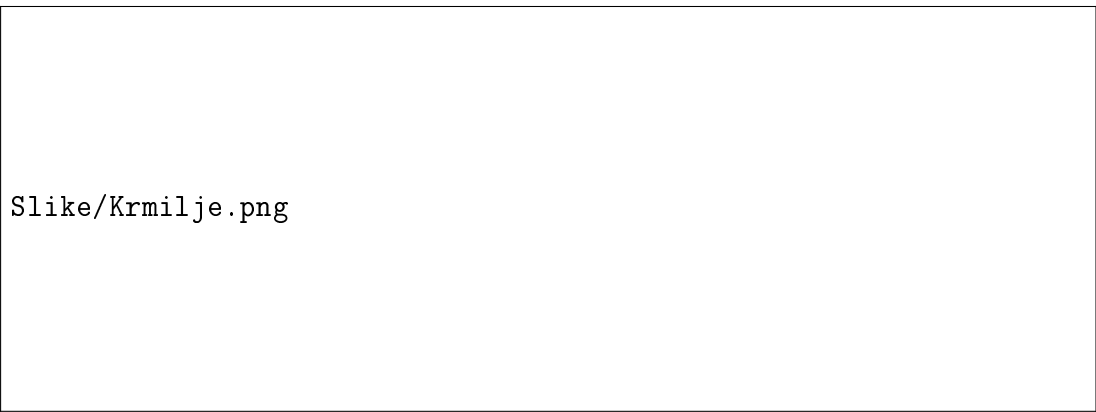
pedančne prilagoditve vezja na oddajnik. Močnostni del vezja je prikazan na sliki ??.



Slika 4.2: Močnostni del vezja z mosfet tranzistorjema in transformatorjem.

Tretji del vezja predstavlja krmiljenje mosfet tranzistorjev. Glavna zahteva je bila, da krmilimo tranzistorja izmenično s faznim zamikom signala za 180° . Merilna kartica Red Pitaya generira izmeničen signal, s katerim je potrebno izmenično krmiliti mosfet tranzistorja. Ideja, ki je podana v literaturi [?] in [?] ni najbolj praktična, saj vsebuje dva neodvisna signalna vira, ki imata zamaknjen signal za 180° , na voljo pa imam le en signalni vir. Uporabil sem vezavo operacijskih ojačevalnikov in sicer najprej kot invertirajoči ojačevalnik za prvi kanal in neinvertirajoči ojačevalnik za drugi kanal. S tem sem ločil signal, ju ojačal

in enemu obrnil fazo za 180° . Signala se nato ojačita še z vezavo operacijskega ojačevalnika kot primerjalnik, s čimer dobimo na izhodu signal z amplitudo napajalne napetosti operacijskega ojačevalnika. Signal ni bil več sinusne oblike ampak pravokotne oblike. Signala gresta nato na vhod integriranega vezja IR2112, ki je namenjen krmiljenju mosfet tranzistorjev. Shema krmilnega dela ojačevalnika je prikazana na sliki ??.

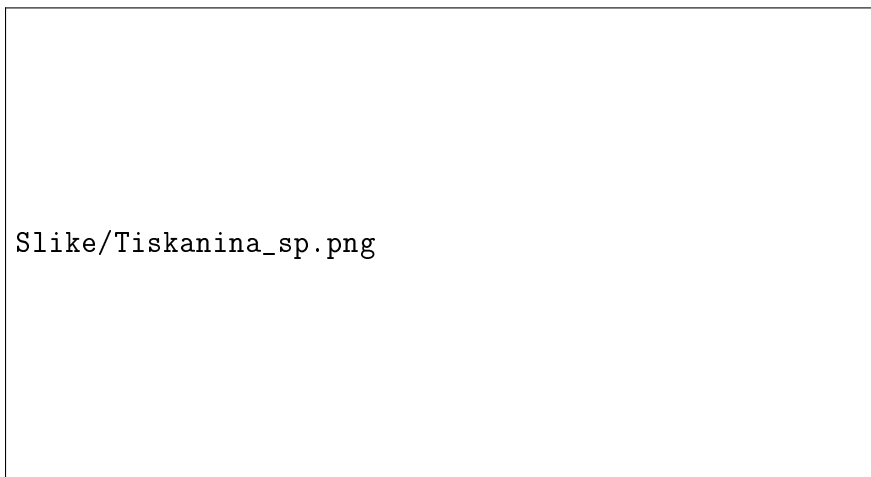


Slike/Krmilje.png

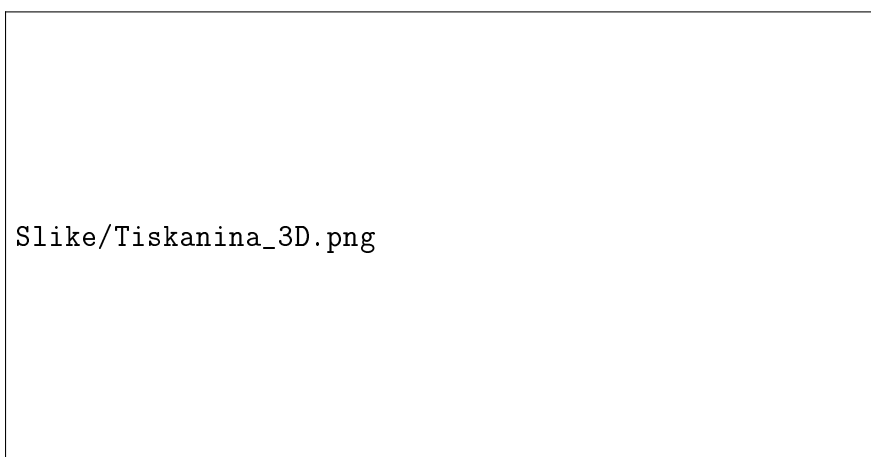
Slika 4.3: Shema za krmiljenje mosfet tranzistorjev.

4.2 Tiskano vezje v programu KiCad

Tiskano vezje sem izdelal v PCB (printed circuit board) editorju Pcbnew. Zaradi enostavnejše izdelave sem jo hotel čimbolj poenostaviti in izdelati enostransko z dovolj širokimi povezavami med elementi, da nebi prihajalo do težav s preboji proti masi. Nekatere elemente, ki jih ni vsebovala knjižnica elementov ali pa dimenzijsko niso bili ustrezni sem izrisal sam v programu za izris PCB elementov. Končen izgled tiskanega vezja in 3-dimenzionalen pogled, ki ga omogoča KiCad je prikazan na sliki ?? in ??.



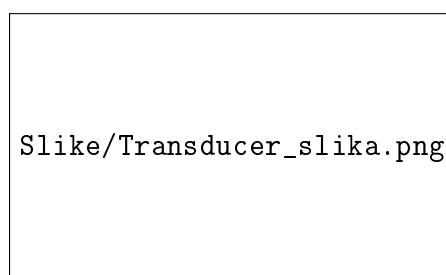
Slika 4.4: Pogled na tiskano vezje iz spodnje strani.



Slika 4.5: 3-dimenzionalen pogled tiskanega vezja v programu KiCad.

5 Meritve in rezultati

5.1 Meritev impedančne in fazne karakteristike ultrazvočnega oddajnika



Slika 5.1: Ultrazvočni oddajnik GS350-D19-BNC-PK.

Na izhodni stopnji ultrazvočni ojačevalnik sem uporabil namensko narejen oddajnik Ameriškega podjetja The ultran group. Uporabljen oddajnik ima 19 mm aktivne površine in nominalno frekvenco 350 kHz. Oddajnik je bil testiran z metodo potopitve oddajnika v vodo z oddaljenostjo 25 mm od odbojnega predmeta.

Testirali so ga v podjetju z ultrazvočnim generatorjem/sprejemnikom pulza 5800 RP, signal pa je bil izmerjen z osciloskopom TDS360 podjetja Tektronix. Izveden je bil tudi matematičen izračun FFT spektra, ki je prikazan na grafu ???. Nastavitve instrumentov so bile:

- Generator/sprejemnik pulza 5800 RP: energija pulza: $12,5 \mu J$, ojačanje 20 dB, amplituda pulza 20 dB, pasovna širina: 1 kHz do 5MHz.
- Osciloskop TDS360: vertikalna os 2 V/rd, horizontalna os 2 μs /rd.
- FFT spekter: vertikalna os 10.0 dB/rd, horizontalna os 125 kHz/rd.
- Kabel: RG68/U, 2 m.

Moder (zgornji) signal na sliki ?? predstavlja odziv na vhodni pulz, ki ima vršno vrednost 4,6 V.

Rezultati meritev, ki so bile izvedene v podjetju The ultran group:



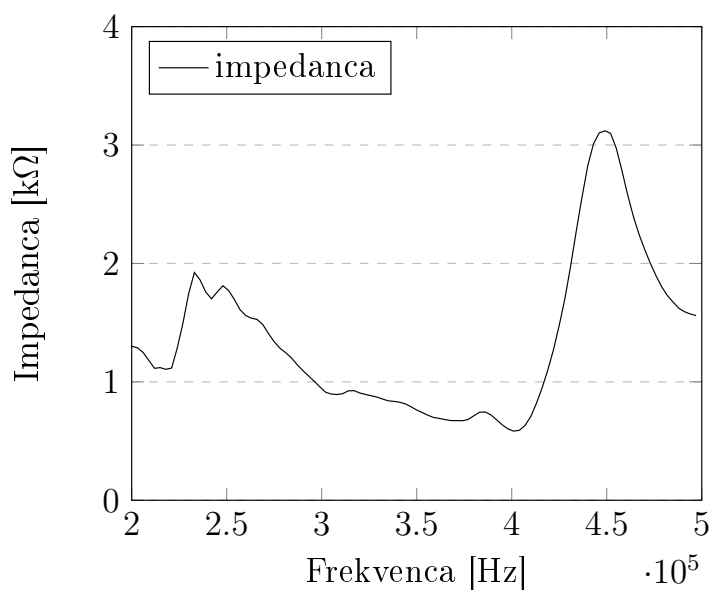
Slika 5.2: Meritev ultrazvočnega ojačevalnika GS350-D19-BNC-PK opravljene v podjetju.

- Vršna vrednost dosežena pri 373 kHz.
- Sredina pasovne širine 393 kHz.
- Pasovna širina pri -6 dB: 105 kHz.

5.1.1 Impedančna karakteristika ultrazvočnega oddajnika

Impedančno karakteristiko ultrazvočnega oddajnika podjetja The ultran group (model GS350-D19-BNC-PK) sem izmeril s pomočjo preciznega LCR metra 1920 Precision LCR Meter, podjetja QuadTech. Meritev je potekala v 100 korakih od frekvence 200 kHz do 500 kHz, ker je to območje zanimivo za konkretno aplikacijo. Potek impedančne karakteristike je prikazan na sliki ???. Horizontalna os prikazuje frekvenco, na vertikalni pa je prikazana amplituda impedance.

Na sliki ??? vidimo, da je impedanca najmanjša v frekvenčnem pasu od frekvence 300 kHz do frekvence 400 kHz. Okrog frekvence 400 kHz ima minimum,

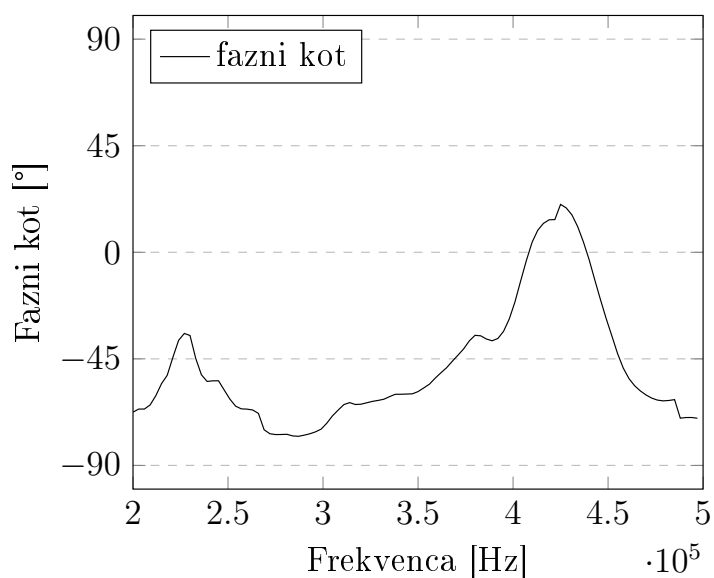


Slika 5.3: Impedančna karakteristika ultrazvočnega oddajnika.

ki mu pravimo glavna resonančna frekvenca, pri kateri je impedanca oddajnika najmanjša in znaša 580Ω . Oddajnik je najbolje uporabljati okrog te frekvence, saj je takrat možen največji prenos energije iz napajalnega vira do oddajnika.

5.1.2 Fazna karakteristika ultrazvočnega oddajnika

S preciznim LCR metrom sem izmeril tudi fazno karakteristiko oddajnika v frekvenčnem območju od 200 kHz do 500 kHz. Iz poteka na sliki ?? se vidi, da fazni kot v območju resonance preide iz negativnega v pozitivnega, kar se ne sklada popolnoma s teorijo, ki je predstavljena v poglavju ??, saj se naj bi fazni kot spremenil vse do $+90^\circ$. Pri meritvi se je fazni kot spremenil od -78° do $+20^\circ$. Opazimo, da je v področju resonance fazni kot pozitiven, v področju antiresonance pa negativen.



Slika 5.4: Fazna karakteristika oddajnika.

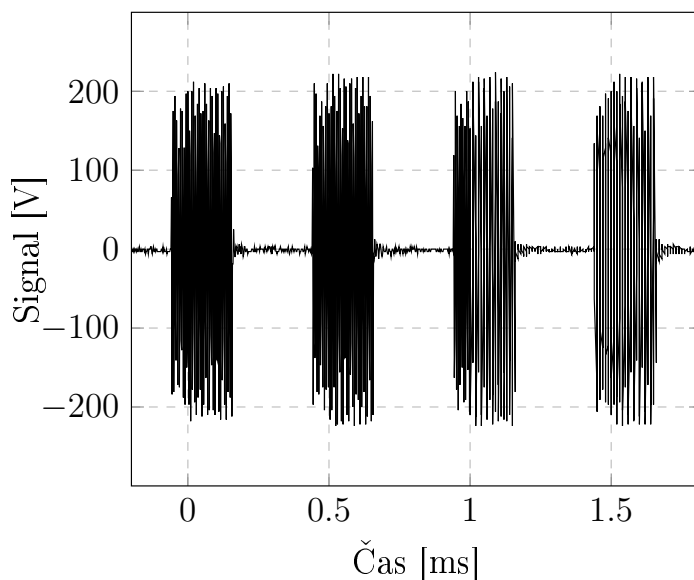
5.2 Signal na izhodu ojačevalnika

Pri meritvi sem uporabil osciloskop MS07104B podjetja Agilent Technology z maksimalno frekvenco vzorčenja 4 GSa/s in merilna kartic Red Pitaya. Pri testiranju vezja in odpravljanju napak sem večinoma uporabljal klasičen osciloskop, nekaj meritev pa sem izvedel tudi z merilno kartico Red Pitaya. Red Pitayo sem uporabil kot generator vhodnega signala in za zajem izhodnih napetosti ojačevalnika, kar je njena glavna prednost, saj nadomešča različne merilne instrumente. Če s katerim od obstoječih instrumentov na merilni kartici uporabnik ni zadovoljen, si ga lahko s poznavanjem kode naredi sam, saj je platforma odprtokodna, kar pomeni, da je prosto dostopna na spletu.

5.2.1 Potek izhodne napetosti ojačevalnika

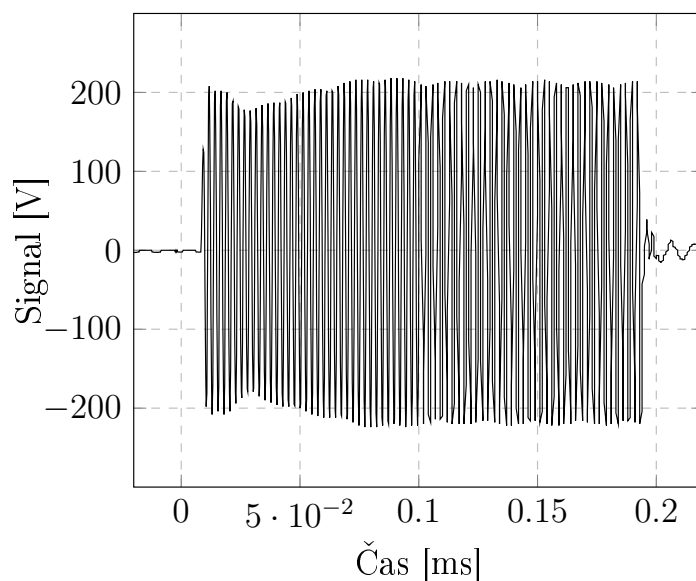
Meritve izhodnega signala sem izmeril z osciloskopom ob priključenem ultrazvočnem oddajniku. Meril sem električni signal na BNC izhodu ojačevalnika. Signal, ki je bil generiran z Red Pitayo, je bil sestavljen iz desetih pulzov, ki so si sledili

eden za drugim s frekvenco 2 kHz, kar pomeni, da bil pulz prožen vsakih 500 μ s. Znotraj ene periode signala je 75 period visokofrekvenčnega signala s frekvenco 350 kHz. Razlog zakaj ravno signal take oblike tiči v uporabi naprave, ker naj bi se uporabljala za proženje tovrstnih signalov [?]. Štirje pulzi signala so prikazani na sliki ??.



Slika 5.5: Potek tipičnega signala štirih pulzov na izhodu ultrazvočnega oddajnika.

Iz slike ?? in ?? vidimo, da je amplituda signala okrog 200 V oziroma malo več kot 400 V vršne vrednosti. Perioda pulzov je 0,5 ms, kar ustreza frekvenci 2 kHz.

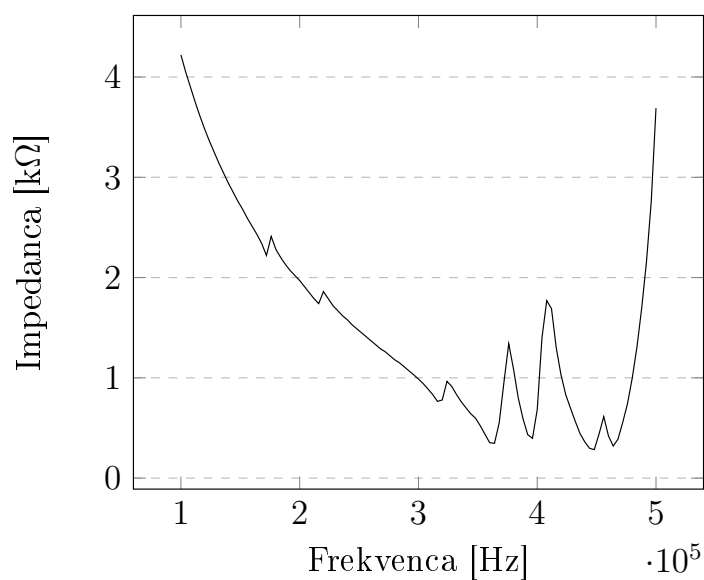


Slika 5.6: Oblika enega pulza.

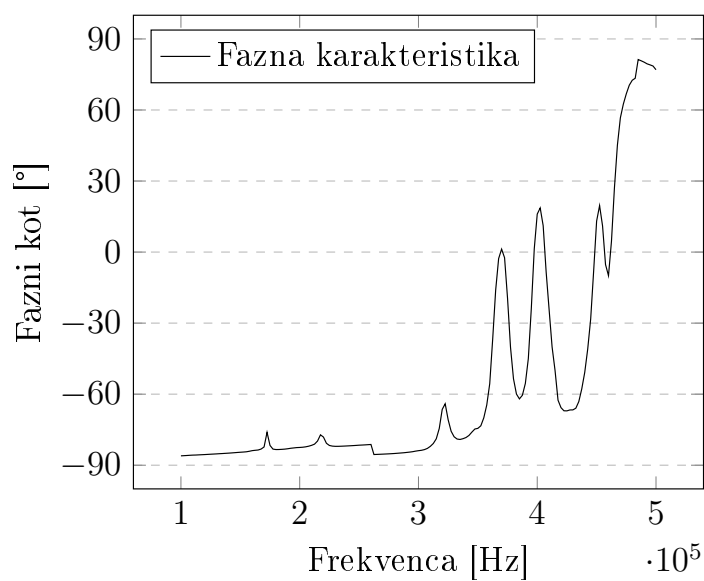
5.3 Meritve z ultrazvočnim oddajnikom (model: MCUSD11A4000B11RS)

Meritve napetosti na izhodu ojačevalnika so prikazane v poglavju ??, zanima pa nas ultrazvočni signal na oddajniku. Da bi izmerili ultrazvočni signal, smo potrebovali merilnik ultrazvoka. Uporabili smo drug ultrazvočni oddajnik z oznako MCUSD11A4000B11RS podjetja Multicomp, ki smo ga uporabili kot sprejemnik ultrazvočnega signala. Oddajnik ima deklarirano resonančno frekvenco $400 \text{ kHz} \pm 16 \text{ kHz}$ in maksimalno priključno napetost 300 V_{p-p} . Kapacitivnost pri 1 kHz znaša $550 \pm 25 \%$. Impedanca in faza oddajnika v frekvenčnem območju od 100 kHz do 500 kHz sem izmeril z LCR metrom 1920 Precision podjetja Quad-Tech. Meritvi impedance in faznega kota sta prikazana na slikah ?? in ??.

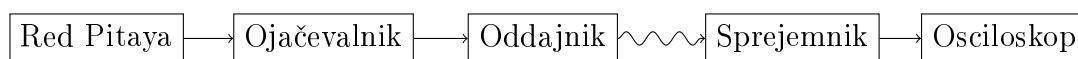
Pri meritvah je oddajnik (MCUSD11A4000B11RS) uporabljen kot sprejemnik ultrazvočnega signala. Za prikaz in shranjevanje točk meritve napetostnega signala sem uporabil osciloskop Agilent MSO7104B. Pri meritvah sem uporabil livček, katerega sem zapolnil z ultrazvočnim gelom, nataknil na oddajnik GS350-



Slika 5.7: Impedanca transducerja MCUSD11A4000B11RS.

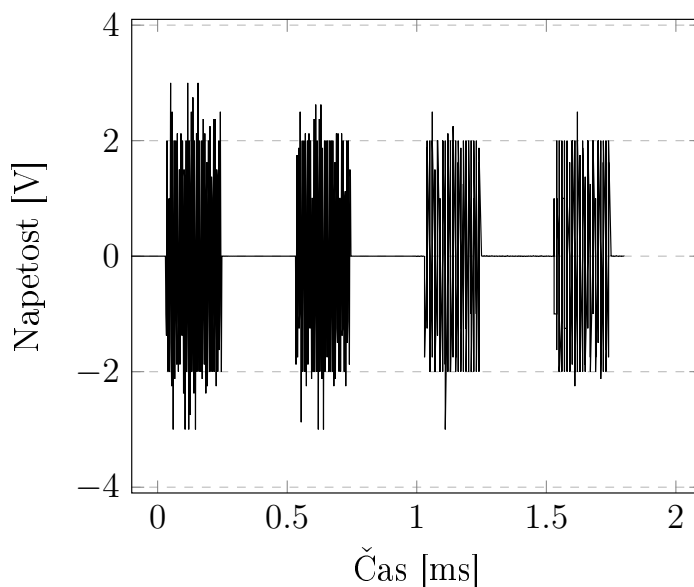


Slika 5.8: Fazna karakteristika transducerja MCUSD11A4000B11RS izmerjena z LCR metrom.



Slika 5.9: Blokovna shema meritve izhodnega signala.

D19-BNC-PK. Na koncu livčka je odprtina debeline 6 mm, kamor sem približal oddajnik namenjen merjenju ultrazvočnega signala. Priključka oddajnika sem povezal preko merilne sonde osciloskopa. Slika ?? prikazuje štiri pulze ultraz-



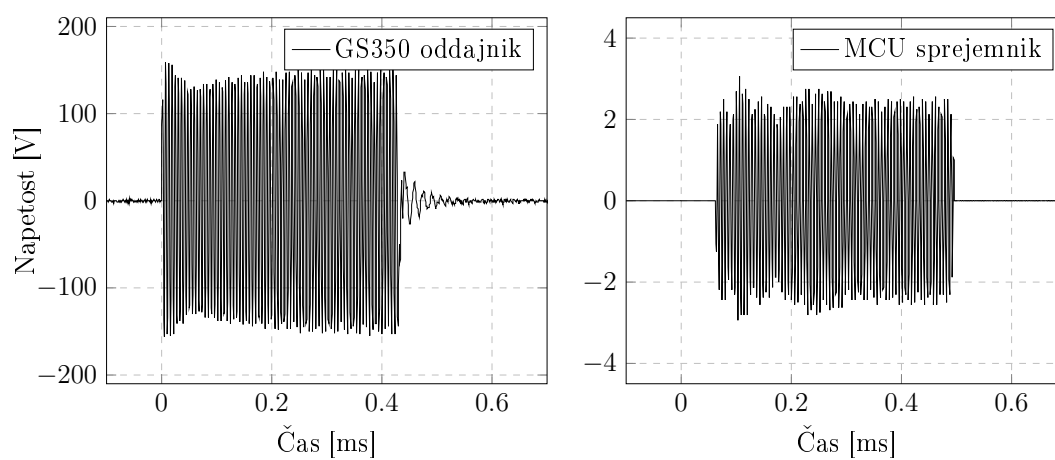
Slika 5.10: Napetostni signal izmerjen z ultrazvočnim sprejemnikom MCUSD11A4000B11RS.

vočnega signala s frekvenco 350 kHz. Pulzi se ponavljajo s frekvenco 2 kHz, kar predstavlja 0,5 ms kar lahko razberemo iz ordinatne osi. Signal ima amplitudi 2,5 V. Blokovna shema meritve je prikazana na sliki ??.

Red Pitaya je namenjena za generiranje signala, ojačevalnik ojači signal, oddajnik oddaja ultrazvočni signal, za sprejem ultrazvočnega signala je uporabljen ultrazvočni sprejemnik MCUSD11A4000B11RS, osciloskop pa za prikaz signalov.

Da pa bi bilo vrednotenje ultrazvočnega signala lažje, sem izmeril napetost na izhodu ojačevalnika ?? levo, kjer je napetost 300 V_{p-p}. Napetost izmerjeno s sprejemnikom ultrazvočnega signala, ki znaša 5 V_{p-p}. Oddaljenost oddajnika od sprejemnika je 4 cm. Karakteristike sprejemnega senzorja so podane v viru [?].

Na sliki ?? opazimo zakasnitev signala na MCU sprejemniku za približno 0,07 ms, kar bilo pričakovati zaradi pretvorbe energije, ki se zgodijo med meritvijo.



Slika 5.11: Napetost na izhodu ojačevalnika (levo) in napetost na sprejemniku MCUSD11A4000B11RS (desno).

Najprej se električen signal pretvori v mehansko (ultrazvok) energijo in nato nazaj v električno.

5.4 Meritve s hidrofonom PVDF RP 41 s

Za meritev jakosti ultrazvoka obstaja nekaj različnih tipov merilnikov, med katerimi so najbolj uveljavljeni hidrofoni, ki imajo precej konstantno občutljivost v širokem frekvenčnem območju. Pri meritvi je bil uporabljen hidrofon RP 41 s podjetja RP acoustic e.K.[?]. Podatki hidrofona so prikazani v tabeli ??.

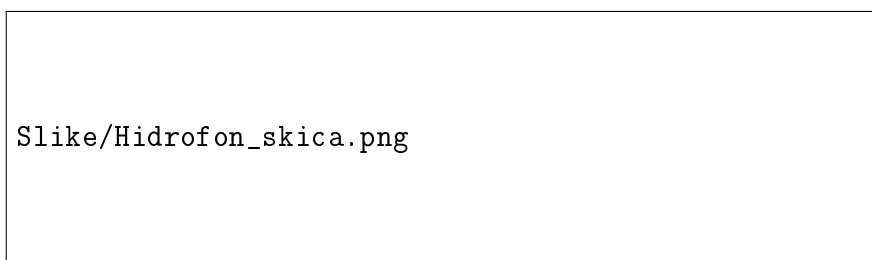
Opis	
Premer občutljivega področja	1 mm
Občutljivost	23 mV/MPa
Frekvenčni razpon	1 kHz - 3 MHz
Dolžina kabla	1,5 m
Dvižni čas	150 ns
Natančnost	+/- 15 %

Tabela 5.1: Tehnični podatki hidrofona.

Uporabljen hidrofon meri jakost ultrazvočnega valovanja v točki kamor ga postavimo. Pri meritvi je bil ultrazvočni oddajnik togo vpet v stojalo, hidrofon pa smo premikali vzdolž širjenja ultrazvočnih valov. Na oddajnik je bil pritrjen livček z ultrazvočnim gelom (optiSonic Ultrasound gel), po katerem se ultrazvok zelo dobro širi. Potrebno je bilo paziti, da je hidrofon vedno postavljen pravokotno na smer širjenja valov, ker v nasprotnem primeru lahko pride do neželenih odbojev od sten livčka, ki služi, da ultrazvočni gel ne steče ven. Hidrofon je prikazan na sliki ??.

Slike/PVDF_1.png

Slika 5.12: Izgled hidrofona.



Slika 5.13: Izgled hidrofona.

Za občutljivost hidrofona igra pomembno vlogo kapacitivnost pri meritvi ultrazvoka zato si v tabeli ?? oglejmo kapacitivnosti pri kalibraciji hidrofona.

Oznaka	vrednost
$C_{hidrofon}$	35 pF
C_{kabelj}	156 pF
$C_{osciloskop}$	15 pF
C_{skupaj}	206 pF

Tabela 5.2: Kapacitivnosti merilnega setupa.

Če je kapacitivnost osciloskopa in s tem povezana kapacitivnost kabla bistveno drugačna od deklarirane moramo občutljivost hidrofona izračunati po enačbi ??.

$$S_{nova} = \frac{S_{stara} \cdot C_{stara}}{C_{nova}} \quad (5.1)$$

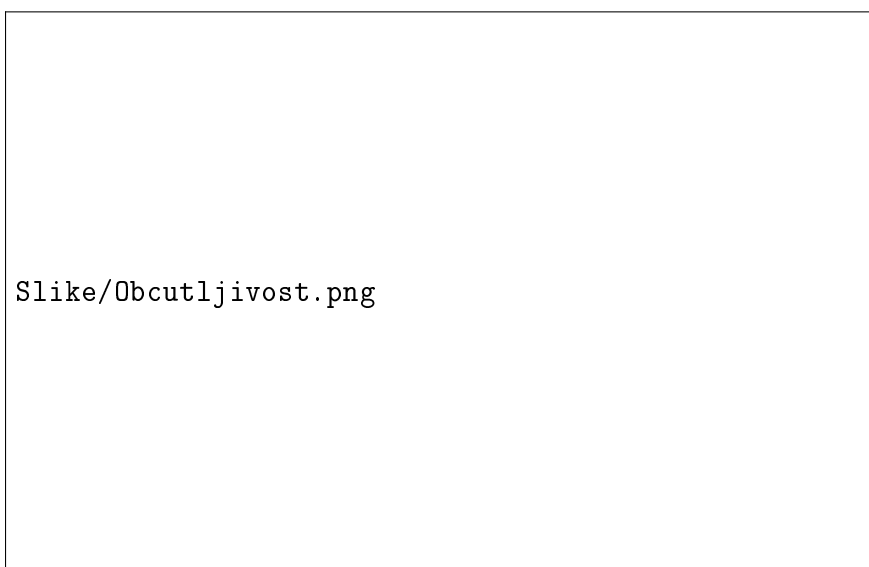
5.4.1 Frekvenčna karakteristika

Med meritvijo piezoelektrični element v hidrofonu generira električni naboj Q , ki predstavlja kapacitivnost (C) piezoelektričnega elementa (merjena napetost $U = \frac{C}{Q}$). Tok skozi vhodno upornost (R) osciloskopa omejuje naboj piezoelektričnega elementa, kar omeji zgornjo frekvenčno mejo, kjer še lahko merimo. Spodnjo mejo izračunamo po enačbi ??.

$$f_u = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (5.2)$$

Kjer C predstavlja kapacitivnost merilnega sistema, ki znaša 206 pF in R vhodno upornost osciloskopa, ki je $1 M\Omega$. Iz enačbe ?? dobimo spodnjo frekvenčno mejo, ki znaša $f_u = 773$ Hz.

Deklarirana občutljivost hidrofona je $2,3 \pm 0,3$ mV/bar, pri frekvencah manjših od 100 kHz. Pri višjih frekvencah se občutljivost spremeni po krivulji na grafu ?. Na sliki ?? vidimo, da je občutljivost hidrofona skoraj konstantna do



Slika 5.14: Graf občutljivosti v odvisnosti od frekvence.

frekvence 100 kHz, potem pa se začne zviševati in doseže vrh pri 700 kHz. Pri še višjih frekvencah se občutljivost spet zmanjšuje.

5.4.2 Izračun moči ultrazvočnega valovanja

Moč ultrazvočnega valovanja izračunamo iz amplitude napetosti po spodnjih enačbah:

Najprej iz izmerjene napetosti u in podane občutljivosti S izračunamo tlak p . Občutljivost odčitamo iz grafa na sliki ??.

$$p = \frac{u}{S} \quad (5.3)$$

Intenziteti (i) ultrazvočnega valovanja izračunamo po enačbi ??.

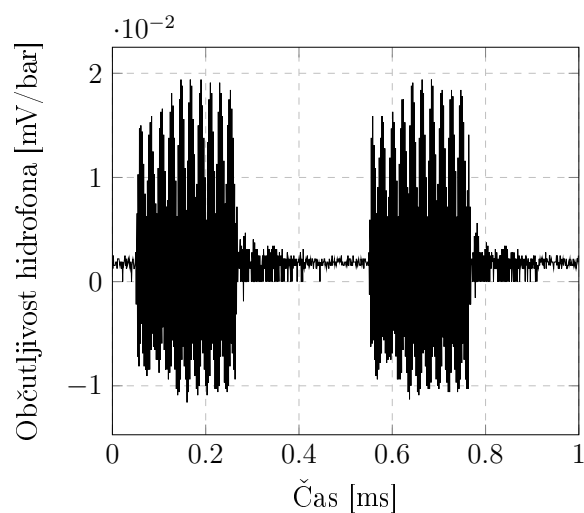
$$i = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (5.4)$$

Kjer p predstavlja tlak, ρ gostoto medija po katerem se širi valovanje, c pa je hitrost zvoka v mediju. Voda ima gostoto 1000 kg/m^3 , hitrost širjenja valov pa je 1497 m/s .

Moč izračunamo kot produkt intenzitete na površino (A). Izračunamo jo po enačbi ??.

$$P = i \cdot A \quad (5.5)$$

5.4.3 Rezultati meritev s hidrofonom PVDF RP 41 s



Slika 5.15: Potek signala izmerjenega s hidrofonom.

Signal na priključnih sponkah hidrofona smo opazovali z osciloskopom MS071048 podjetja Agilent Technologies. Potek električnega signala je prikazan na sliki ?. Oblika signala je zelo podobna vzbujevalnemu signalu na izhodu

ojačevalnika ??). Amplituda izmerjene napetosti doseže 20 mV, kar predstavlja ekvivalent intenzitete $i = 1,6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$. Frekvenca vzbujevalnega signala je bila 350 kHz. Opaziti je, da je izmerjena amplituda signala v pozitivni pol-periodi višja kot v negativni. Različnost amplitude pripisujemo nesimetričnemu preklapljanju tranzistorjev in neidealni postavitvi hidrofona v ultrazvočni gel.

Signal je izmerjen pri frekvenci 400 kHz, kjer je občutljivost hidrofona 4 mV/bar (glej sliko ??). Iz enačbe ?? izračunamo, da je pri amplitudi izmerjene napetosti 8 mV tlak 2 bara. Občutljivost izračunamo iz enačbe ?? in znaša $2,6 \text{ W/cm}^2$.

6 Zaključek

Predstavljena naprava je primerna za generiranje poljubnih signalov v frekvenčnem območju od 0,1 - 1 MHz, pri čemer je potrebno paziti, da uporabimo ustrezen ultrazvočni oddajnik, saj imajo običajno oddajniki resonančno frekvenco, pri kateri dobimo največjo izhodno moč. V izhodnem signalu je prisotnih precej višjih harmonikov, ki so posledica delovanja tranzistorjev v stikalnem režimu. Smiselna bi bila uporaba bipolarnih tranzistorjev v vezavi push-pull, ki bi bila krmiljena zvezno. S tem bi se izognili motnjam, ki se pojavijo pri preklonih mosfet tranzistorjev. Zato predlagam izbiro bipolarnih tranzistorjev, ki bi bili krmiljeni v linearnem režimu. Napravi bi bilo smiselno dograditi še en vhod na katerega bi preko ojačevalnika povezali hidrofona za direktno merjenje generiranega signala. Vezje bi moralo vsebovati ojačevalnik signala, aplikacija pa bi morala omogočati prikaz ultrazvočnega signala z izračunom moči, da bi uporabnik lahko direktno opazoval trenutno moč signala.

Tiskano vezje, ki je predstavljeno v poglavju ?? na sliki ?? ima še precej možnosti za izboljšavo. Predvsem z vidika elektromagnetnih motenj, ki so bile problematične pri preizkusu naprave, ko smo merili aktivacijski potencial na kovinskih elektrodah, kjer se je zaradi elektromagnetnih motenj inducirala napetost, ki je onemogočala zaznavo aktivacijskega potenciala živca z amplitudo nekaj mV.

Med testiranjem ojačevalnika smo dobili najbolj zanesljive rezultate o delovanju s pomočjo hidrofona, saj smo le tako lahko točno določili jakost ultrazvočnega signala na izhodu ultrazvočnega oddajnika. Meritve in izračun moči ultrazvočnega signala so predstavljene v poglavju ?. S hidrofonom lahko merimo signale v

širokem frekvenčnem pasu, zato bi ga lahko uporabili tudi za merjenje ultrazvoka na drugih področjih elektrotehnike, medicine in drugje, kjer je potreba po meritvi ali opazovanju oblike ultrazvočnega signala.

Literatura

- [1] Svilainis L., Dumbrava V., Motiejunas G. Optimization of the Ultrasonic Excitation Stage. Kaunas University of Technology, Department of Signal Processing Studentu str. 50-340, LT-51368, Kaunas, Lithuania.
- [2] Svilainis L., Dumbrava V., Motiejunas G. Ultrasonic generator-transducer combined performance enhancement. Kaunas University of Technology, Department of Signal Processing Studentu str. 50, LT-51368, Kaunas, Lithuania.
- [3] Woo J. A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology. Part 1, <http://www.ob-ultrasound.net/history1.html> (14.10.2014).
- [4] Muševič I. Ultrazvok. Izročki predavanja. http://lbf.ijs.si/Biofizika/SlikovneTehnike/Ultrazvok_igor_izrocki.pdf, (14.10.2014).
- [5] Amon S. Piezoelektrični elementi. Skripta Elektronske komponente in senzorji, 6. Poglavje <http://lms.fe.uni-lj.si/amon/>. (17.10.2014).
- [6] Ghasemi N. Improving ultrasound excitation systems using a flexible power supply with adjustable voltage and frequency to drive piezoelectric transducers. A Thesis by Publication submitted in Partial Fulfilment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy. Science and Engineering Faculty School of Electrical Engineering and Computer Science Queensland University of Technology Queensland, Australia, November 2012.

- [7] "Publication and Proposed Revision of ANSI/IEEE Standard 176-1987 "ANSI/IEEE Standard on Piezoelectricity", "IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 43, p. 717, 1996.
- [8] Zajec P. Skripta predavanj pri predmetu Industrijska elektronika 2013/14. Poglavje: Operacijski ojačevalnik, str. 15.
- [9] Texas Instruments. LM108,LM118,LM741 Predicting Op Amp Slew Rate Limited Response. <http://www.ti.com/lit/an/snoa852/snoa852.pdf>. (4.11.2014).
- [10] Niknejad A. Electromagnetics for High-Speed Analog and Digital Communication Circuits, poglavje 7, str. 168-200. Cambridge University Press, 2007.
- [11] Mlakar J. Linearna vezja in signali, Založba FE in FRI, str. 59-61, str. 115-118.
- [12] Horst Rohlfing, Harry Schmidt, Blaž Tominc, Wilhelm Friedrich, Kati Tominc, Friedrich-ov priročnik za elektrotehniko in elektroniko, Tehniška založba Slovenije, 1995.
- [13] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, Design of rotating electrical machines, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6, 2008.
- [14] Kraut Bojan, Krautov strojniški priročnik, 10. slovenska izdaja, izdajo pripravil Jože Puhar, Ljubljana, Tehnična založba Slovenije, 1993, str. 125, 570.
- [15] International Rectifier, spletna stran podjetja. Dostopna na povezavi: [http://www.irf.com/part/_/A_IR2112:](http://www.irf.com/part/_/A_IR2112;), (26.12.2014).
- [16] Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko, Prožilna vezja MOSFET in IGBT tranzistorjev. Dostopno na spletni strani: http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/UNIVSS/elek_napr/igbt_drive_1del.pdf

- [17] Yusuf Tufail, Anna Yoshihiro¹, Sandipan Pati, Monica M Li & William J Tyler, Ultrasonic neuromodulation by brain stimulation with transcranial ultrasound, *Nature Protocols*, 1453–1470, 1. september 2011.
- [18] Karakteristike ultrazvočnega oddajnika/sprejemnika MCUSD11A4000B11RS, dostopne na spletni strani: <http://uk.farnell.com/multicomp/mcusd11a400b11rs/transceiver-400khz-11mm-metal/dp/2362691>, (22.4.2015).
- [19] Spletna stran podjetja RP acoustic e.K.: http://www.rp-acoustics.de/english/PVDF_Hydrophone.htm