

Visokonapetostni ojačevalnik za krmiljenje piezo aktuatorja

Seminarska naloga pri predmetu elektronska vezja

Matjaž Janežič
11.2.2016

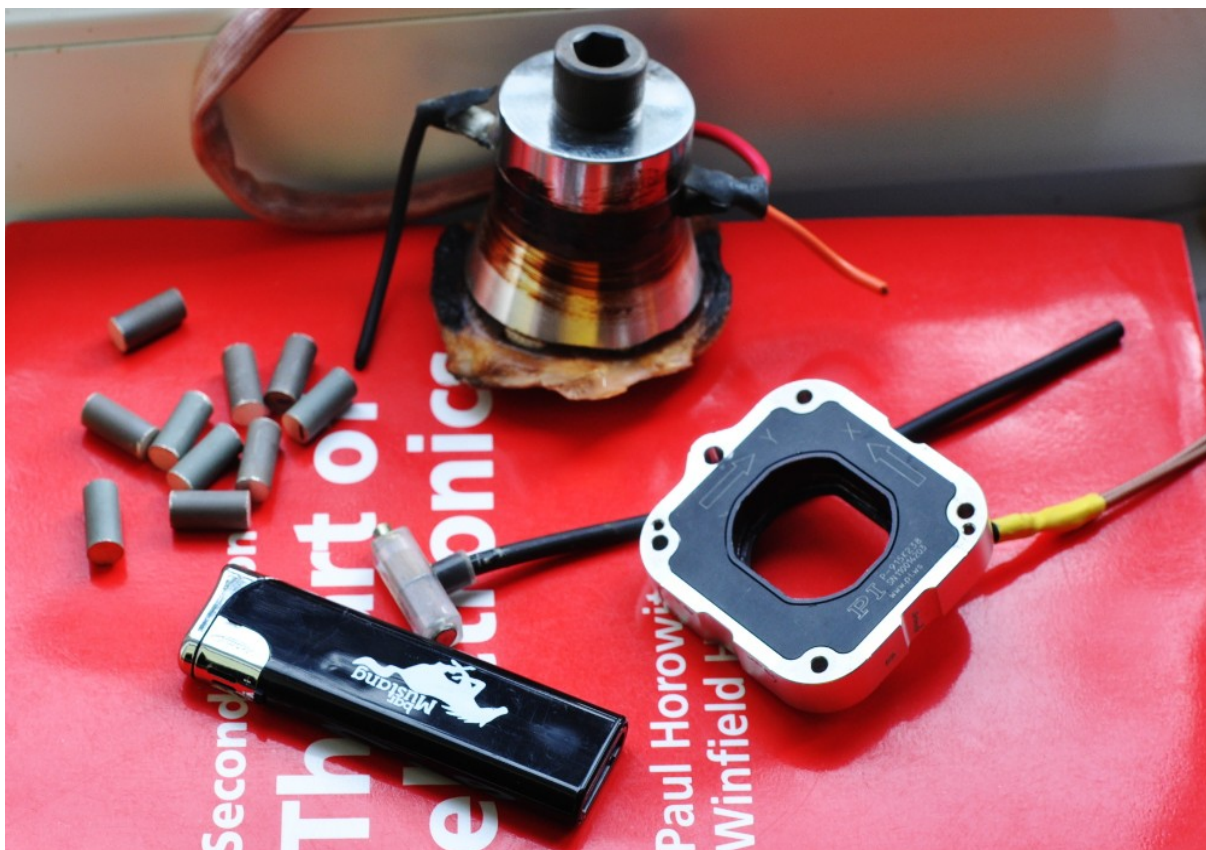
Kazalo vsebine

Uvod.....	3
Opis vezja.....	5
Meritve.....	9
Prenosna karakteristika.....	9
Mehanske meritve.....	12
Meritve šuma.....	13
Meritve v časovnem prostoru.....	15
Simulacije v programu LTSpice.....	18
Zaključek.....	20
Literatura.....	21

Uvod

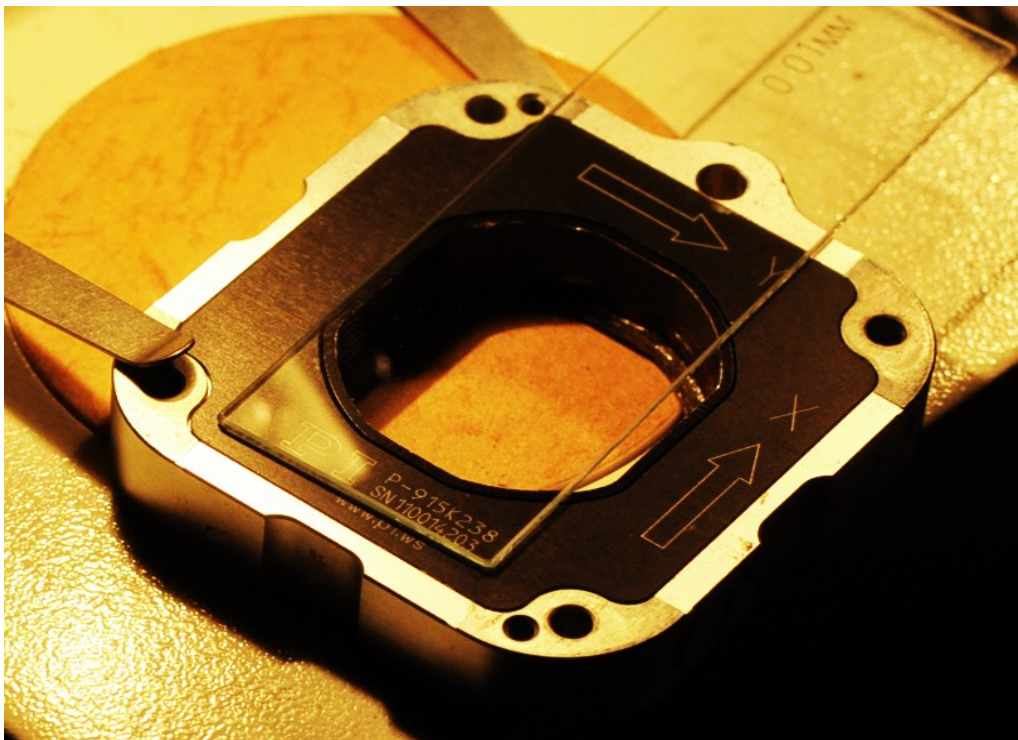
V današnjem "niskonapetostnem" svetu je pravzaprav izdelava vezij, ki delujejo pri visoki napetosti dokaj neobičajna. Predvsem se to odraža na dobavljivosti in ceni komponent, ki morajo biti prilagojene na delovanje pri takih pogojih. Miniaturizacija za komponente pri visoki napetosti ne pride v poštev, prav tako so disipacije moči na posameznih komponentah hitro "precej" visoke. Poglavitna težava pri takšnih vezjih je zagotovo varnost, saj moraš z njimi rokovati precej previdno, saj so lahko napetosti višje od varno določenih.

V seminarski nalogi je predstavljen visokonapetostni ojačevalnik za pogon piezo aktuatorja. Le-ti delujejo na principu deformacije snovi pod vplivom električnega polja[1]. Izdelani so lahko iz monokristalnega materiala kot je na primer kvarc ali polikristalnega kot je svinčev-cirkonijev-titanat (PZT). Slednji je zaradi cenenosti, preproste izdelave in zadovoljivih lastnosti danes največkrat uporabljen. Aplikacije obsegajo od visokonapetostnih generatorjev za vžigalnike, ultrazvočnih čistilcev, zvočnikov in seveda aktuatorjev (slika 1). Piezo aktuatorji (slika 2) so uporabljeni v aplikacijah, ki zahtevajo srednje velike sile, majhne pomike, zelo majhne korake in dokaj dobro ponovljivost, ki jo žal kvari histereza.



Slika 1: Primeri uporabe piezo elementov. V ozadju je 50W 28kHz resonator za ultrazvočni čistilnik, levo so 100 kHz kristali za ultrazvočni pretvornik, v sredini je poleg piezo vžigalnika tudi element za vžig plina v plinskih štedilnikih, desno je XY piezo aktuator

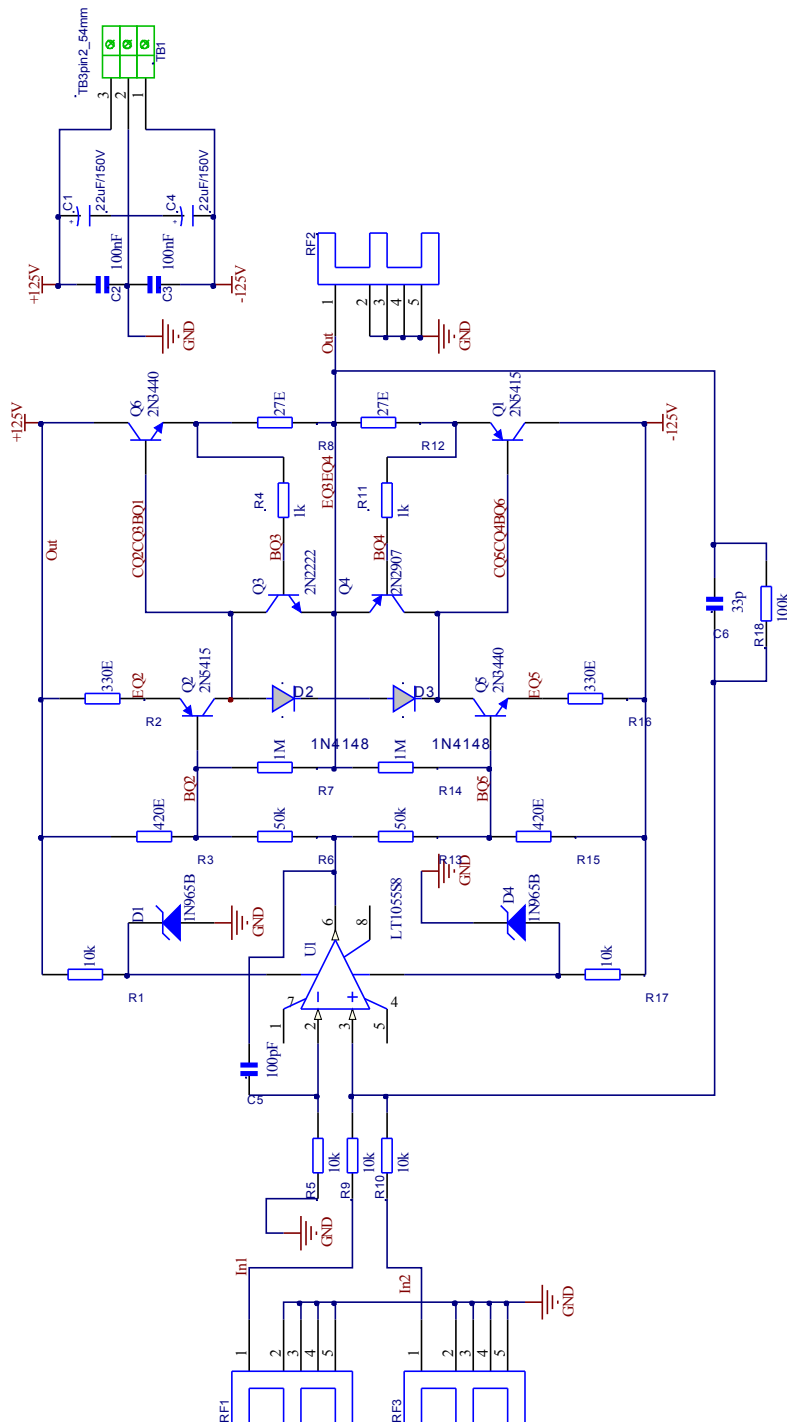
Piezo koeficient je za PZT materiale približno od 120 do 500 pm/V (pikometrov na volt), zato se za večje pomike potrebuje višje napetosti (večje električno polje E) v povezavi z daljšim kristalom ali mehansko množenje s pomočjo vzvodov. Daljši kristal zahteva višje napetosti, ki z elektronskega stališča niso praktične, zato se kristal razdeli na več manjših odsekov, katere se mehansko zlepi zaporedno, električno pa se jih zveže vzporedno. S tem se doseže višje električno polje E (krajši kristal) in posledično večje raztezke (skrčke). V praksi to pomeni napetosti 50...150V namesto več kilovoltov, kar so razmeroma še lahko obvladljive napetosti v primerjavi s slednjimi. Piezo aktuatorji imajo od ostalih aplikacij še eno pomembno razliko, namreč morajo imeti enosmerno napajanje, zato mora biti električna kontrolna enota (ojačevalnik) zvezan enosmerno. Akustični pretvorniki (zvočniki) so lahko zvezani izmenično, zato se visoke napetosti lahko generirajo s pomočjo transformatorja iz nizke napetosti.



Slika 2: piezo XY aktuator, na njemu je mikroskopsko stekelce z merilno skalo.

Opis vezja

Izbrani ojačevalnik [2] je zmožen ojačevati enosmerne signale (DC) in ima bipolaren izhod z pretokovno zaščito v primerjavi z [3]. Bipolaren izhod je nujen za obe smeri pomika. Pasovna širina ni kritična, originalni tekst jo omenja kot 15 Khz. Shema vezja je na sliki 3.



Slika 3: shema vezja

Ojačevalnik ima sledeče poglavitne sklope: izhodna stopnja z emitorskim sledilnikom, pretokovna zaščita izhoda, vmesna ojačevalna stopnja, vhodni ojačevalnik in napajalnik vhodnega ojačevalnika. Izhodno stopnjo sestavljata tranzistorja Q6 in Q1, ki sta vezana v vezavi emitorskega sledilnika. Izhodni tok se zaznava preko uporov R8 in R12 z upornostjo 27Ω . Maksimalen tok je sledeč:

$$I_{max} = \frac{U_{be0}}{27\Omega} \approx \frac{0,6V}{27\Omega} = 22 mA$$

V primeru, da izhodni tok preseže vrednost približno 22mA, tranzistorja Q3 in Q4 začneta nižati napetosti v baze tranzistorjev Q6 in Q1. Posledično se zato znižuje izhodna napetost. Pri vzbujanju aktuatorja to ni dobrodošla sprememba izhodne napetosti v kontroli pozicije (nadzorna zanka XY deluje v odprtozančnem načinu), zato mora biti poskrbljeno, da se ne preseže toka, že med generiranjem vzbujalnih signalov (Piezo aktuator se kot breme predstavlja v vlogi kondenzatorja) z omejitvami hipnih sprememb.

Vmesno ojačevalno stopnjo predstavljata tranzistorja Q2 in Q5, diodi D2 in D3 poskrbita za prednapetost, da izhodna stopnja deluje v načinu AB. Vmesna stopnja ima vlogo napetostnega ojačevalnika, da ojači signale $\pm 10 V$ v območje vsaj $\pm 100 V$. Z razmerjem uporov R6/R7 in R14/R13 je ojačenje vmesne stopnje vsaj 20, kar popolnoma zadostuje. Upori R3, R6, R13 ter R15 imajo še pomembno postransko vlogo, saj po izklopu napajanja poskrbijo za nadzorovano praznjenje blokirnih kondenzatorjev C1 in C4, ki sta elektrolitska (adsorbpcija naboja).

Glavna povratna vezava je zaključena z vhodnim operacijskim ojačevalnikom, kateremu se le-to zaključi na pozitivni vhod, saj negiranje zagotovi že vmesna ojačevalna stopnja. Celotno ojačenje je določeno z razmerjem uporov R18 ter R9 in je 10.

Frekvenčno kompenzacijo vhodne stopnje zagotavljata kondenzator C5 ter upor R5. Redki operacijski ojačevalniki delujejo z napajalnimi napetostmi višjimi od $\pm 18 V$ (razen posebnih hibridnih izvedb), zato je vhodni ojačevalnik LT1055 napajan preko uporov R1 ter R17 in zener diod D1 ter D4 z napetostjo $\pm 15 V$. Integrirano vezje LT1055 je JFET operacijski ojačevalnik z nizko offset napetostjo (pod $150 \mu V$) ter nizkim predtokom (pod $200 pA$). Dvojni vhod je bil mišljen za seštevalno stopnjo, toda funkcija seštevanja dveh signalov se odvije že v predojačevalniku, zato tu ni potrebno. Upora R9 in R5 sta posledično lahko z enakima vrednostima za minimiziranje vpliva predtoka (I_b) vhoda v operacijski ojačevalnik. Upor R10 tako ni potreben. Poraba vezja je približno $2 \cdot 15 mA$, pri čemer na napajalnik vhodne stopnje odpade:

$$I_{R1} = 15 mA - \frac{U_{VCC} - U_{zd}}{R_1} = 15 mA - \frac{115 V - 15 V}{10 k\Omega} = 10 mA$$

Največja stalna disipacija je ravno na uporih R1 in R17 in znaša:

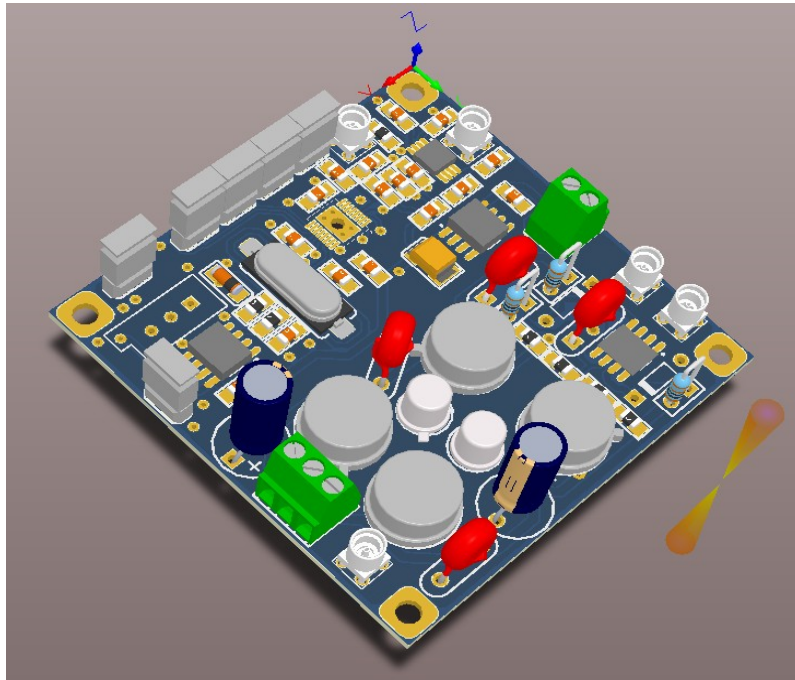
$$P_{R1} = \frac{U_{R1}^2}{R1} = \frac{(U_{VCC} - U_{zd})^2}{R1} = \frac{(115 V - 15 V)^2}{10 k\Omega} = 1 W$$

Največja dinamična disipacija (obremenitev izhoda je kapacitivnega značaja, zato teče največji tok le ob spremembah) ki je:

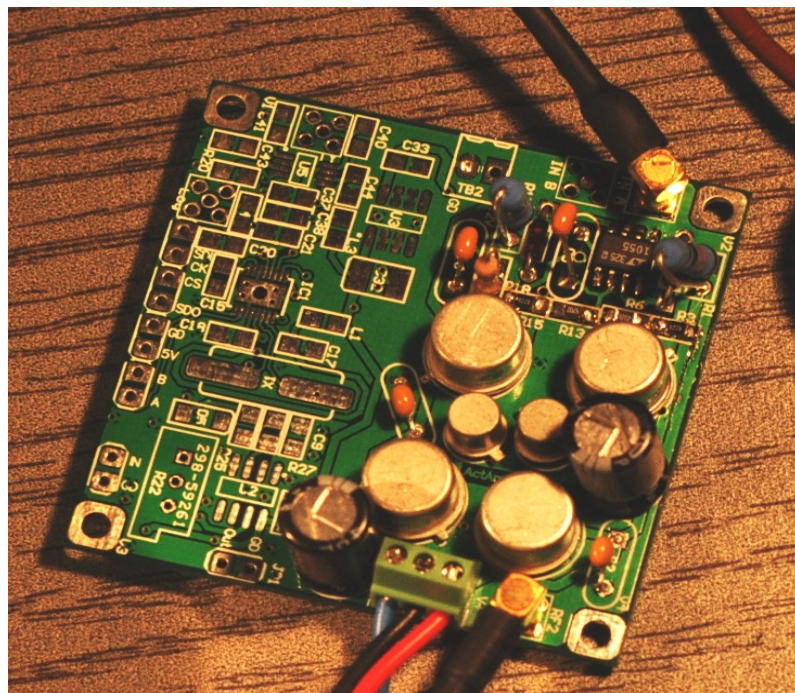
$$P_{Q6max} = U_{VCC} \cdot I_{lim} = 115 V \cdot 0,022 mA = 2,5 W$$

Pomembne so tudi napetosti na komponentah, za upore velikosti 0805 je maksimalna dopustna napetost $150 V$, za upore 1206 pa je maksimalna dopustna napetost $250 V$. Napetostno sta najbolj obremenjena upora R7 in R14, saj je lahko doseže tudi $200V$ (R3 ima majhen padec, izhod pa je hkrati na maksimalni negativni vrednosti). Tok skozi R7 lahko doseže približno vrednost:

$$I_{R7} = \frac{200 V}{1 M} = 0,2 mA$$



Slika 5: 3D pogled na vezje



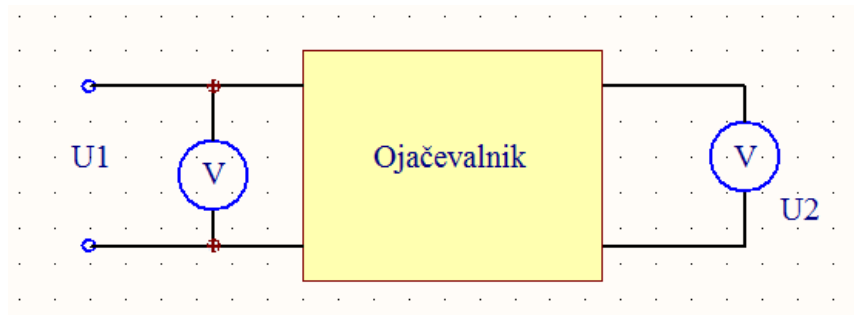
Slika 6: izdelano vezje ojačevalnika.

Meritve

Prenosna karakteristika

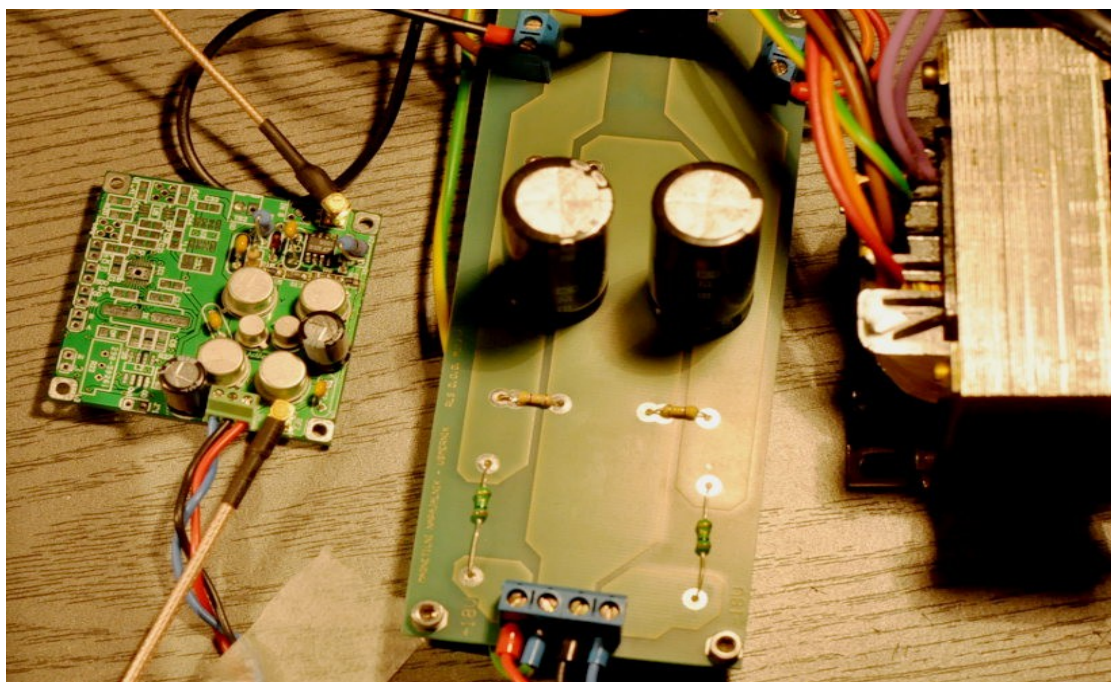
Poleg osnovnega merjenja porabe in napajalne napetosti, so bile izvedene tudi meritve prenosne karakteristike, šuma, odziva na vhodni signal brez bremena in z bremenom.

Prenosna karakteristika (slika 7) se je merila z enosmernim virom na vhodu ojačevalnika.



Slika 7: vezava za merjenje prenosne karakteristike

Napajalni vir za ojačevalnik je E transformator 230 V/80 V, s polnovalnim usmerjanjem in glajen s kondenzatorjema. Na sliki 8 je prikazano izdelano vezje in njegov napajalnik, ki je izdelan na posebnem vezju.



Slika 8: izdelano vezje in njegov napajalnik

V tabeli so rezultati meritve prenosne karakteristike ter izračunane vrednosti:

U1 [V]	U2 [V]	Izračunana idealna napetost [V]	Odstopanje U2 od idealne napetosti [V]	Odstopanje preračunano na vhod [V]
-12.00	106.93	116.62	-9.69	-1.00
-11.00	106.73	106.90	-0.17	-0.02
-10.00	97.00	97.18	-0.18	-0.02
-9.00	87.50	87.47	0.03	0.00
-8.00	77.75	77.75	0.00	0.00
-7.00	68.12	68.03	0.09	0.01
-6.00	58.43	58.31	0.12	0.01
-5.00	48.80	48.60	0.20	0.02
-4.00	39.02	38.88	0.14	0.01
-3.00	29.29	29.16	0.13	0.01
-2.00	19.53	19.44	0.09	0.01
-1.00	9.85	9.73	0.12	0.01
-0.02	0.29	0.20	0.09	0.01
0.06	-0.70	-0.57	-0.13	-0.01
1.00	-9.86	-9.71	-0.15	-0.02
2.00	-19.55	-19.43	-0.12	-0.01
3.00	-29.27	-29.14	-0.13	-0.01
4.00	-38.96	-38.86	-0.10	-0.01
5.00	-48.66	-48.58	-0.08	-0.01
6.00	-58.42	-58.30	-0.12	-0.01
7.00	-68.15	-68.02	-0.13	-0.01
8.00	-77.79	-77.73	-0.06	-0.01
9.00	-87.41	-87.45	0.04	0.00
10.00	-97.07	-97.17	0.10	0.01
11.00	-106.66	-106.89	0.23	0.02
12.00	-107.95	-116.60	8.65	0.89

S pomočjo programa Scilab so bili izračunani parametri idealne prenosne karakteristike s pomočjo metode najmanjših kvadratov (linearna regresija). Meritvi pri +12 V in -12 V na vhodu nista bili upoštevani, saj ojačevalnik že stopi v zasičenje.

```
x=u(:,1);
y=u(:,2);
x1=u(2:N-1,1);
y1=u(2:N-1,2);
coefs=regress(x1,y1)
a=coefs(1);
b=coefs(2);
```

Izračunana koeficienta sta:

$$a=0.0082794$$

$$b=-9.7176574$$

koeficient a ima enote v voltih in določa offset ojačevalnika, ki znaša 8,2794 mV, koeficient b določa ojačenje, ki je -9,7176574, torej odstopa od načrtovanega -10. Idealna krivulja je definirana kot:

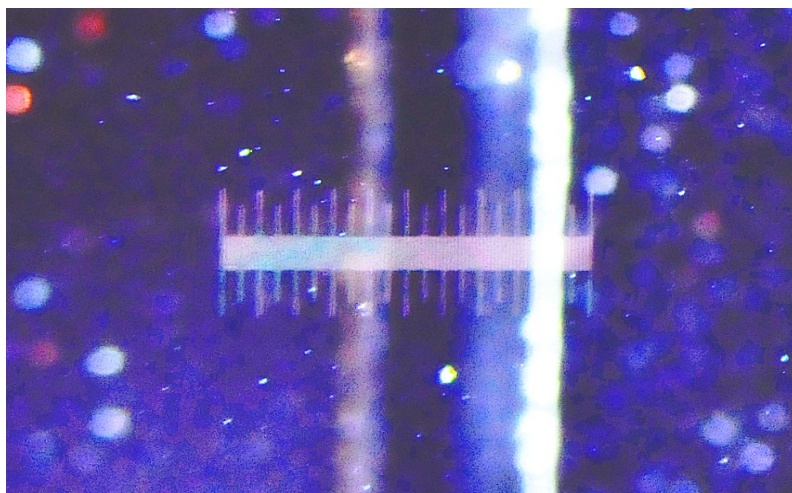
$$U_2 = a + b * U_1$$

Odstopanje izhodne napetosti od idealne krivulje je podano v četrtem stolpcu.

Sprva izgleda, da je izhod izredno nelinearen in je torej ojačevalnik izredno slab, zato je potrebno bolj podrobno pregledati metodo merjenja. V petem stolpcu je tako izhodno odstopanje preračunano na napako na vhodu. Merilnik na vhodu je bil digitalni z resolucijo 3,5 ter na izhodu z resolucijo 4,5. To pomeni, da je bil na vhodu merilnik nastavljen na merilni obseg 20 V, s korakom 10m V. Preračunana napaka na vhod je tako v istem obsegu, kot je korak meritve, to pa pri digitalnem inštrumentu pomeni, da je napaka enaka intrinzičnem sistematskemu pogrešku zaradi odčitavanja digitalnega multimetra. Z obstoječo opremo žal ni bilo možno izmeriti prenosne karakteristike, saj je omejitev merilna oprema.

Mehanske meritve

Mehanska meritev pod lupo (x 20) z merilno letvijo je pokazala ocenjen pomik približno dve stotinki milimetra pri spremembi napetosti 200 V (slika 9). Binokularna lupa je zaradi različnega fokusa precej otežila meritev zaradi paralakse - gradacija na letvi je morala biti na drugi strani stekla, kot je bil aktuator, saj se drugače gradacije ni videlo, ker merilne letve ni bilo možno pravilno osvetliti v drugih primerih.



Slika 9: skala nad aktuatorjem

Pri polnem obsegu 200 V spremembe napetosti in uporabo 16-bitnega DA pretvornika, se dobi korak nastavitve napetosti:

$$dV = \frac{200 \text{ V}}{65536} = 3,05 \text{ mV}$$

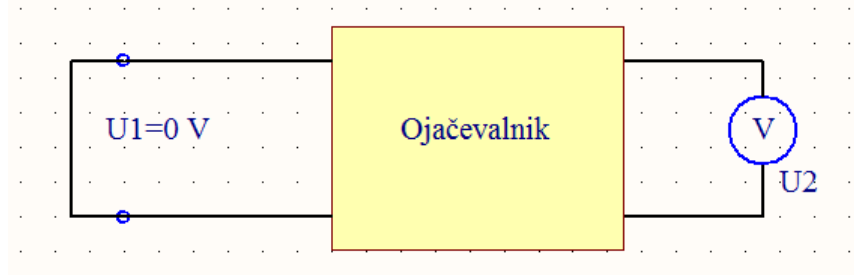
Mehanski pomik pri temu koraku je:

$$dl = \frac{20 \text{ } \mu\text{m}}{65536} = 0,305 \text{ nm}$$

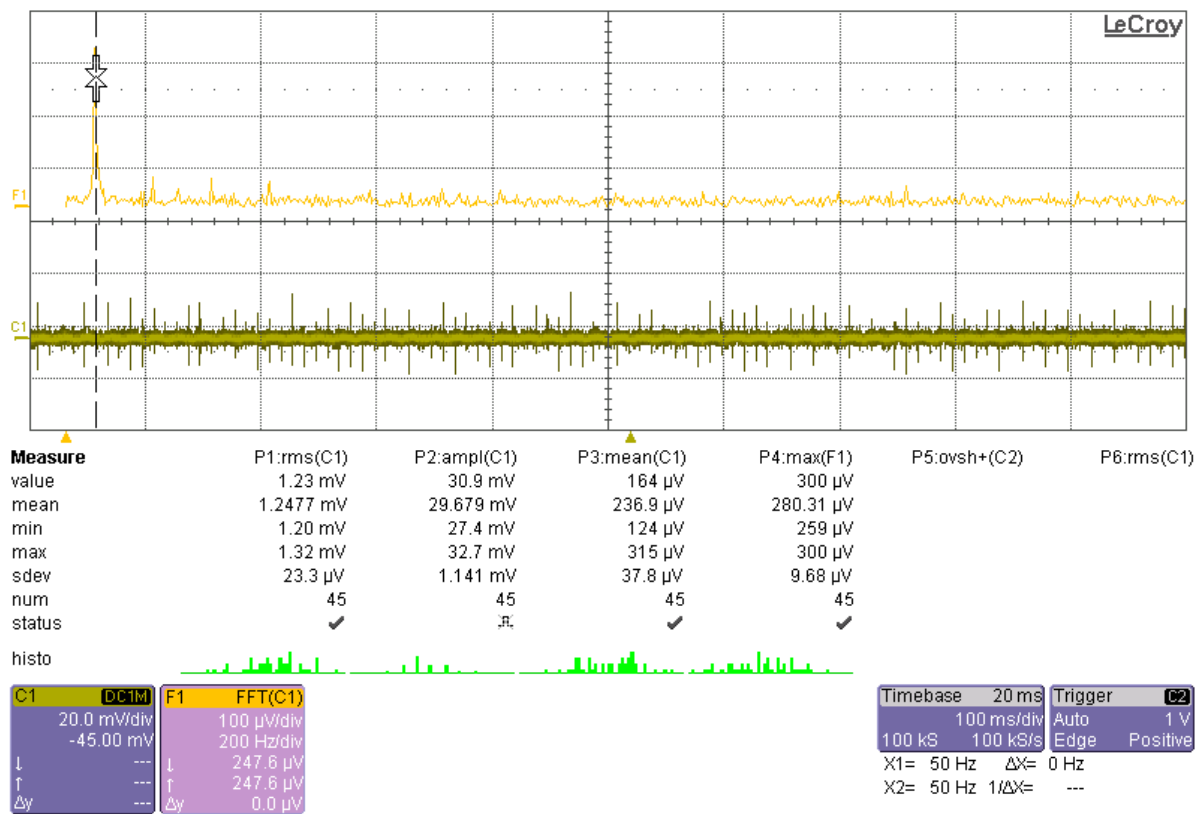
Razdalje med atomi so približno 0,1 nm [5]. To je tudi razlog za dvojni vhod, ki bi sešteval napetosti dveh DA pretvornikov, z enim bi bilo možno nastavljanje grob položaj, drugi pa bi omogočal (ob idealni DA pretvorbi) nastavljanje položaja vsaj z 0,01 nm resolucijo, torej s korakom napetosti 0,1 mV oziroma manj. Seštevanje je sedaj predvideno v predojačevalniku.

Meritve šuma

V naslednji meritvi je izmerjen šum [5] ojačevalnika (slika 10). Vhod ojačevalnika je kratko sklenjen, meritev PP vrednost šuma osciloskopa in predojačevalnika je 29,7 mV, iz tega sledi ocenjena RMS vrednost približno 3 mV (slika 11).



Slika 10: kratko sklenjen vhod za meritev šuma



Slika 11: meritev šuma in FFT analiza šuma

Meritve kratko sklenjene vhodne sponke osciloskopa oceni PP vrednost šuma samega osciloskopa kot 8,5 mV, RMS vrednost šuma osciloskopa znaša približno 0,8 mV (slika 12). Med RMS vrednostimi napetosti obstaja kvadratična relacija, tako je RMS vrednost šuma, ki ga doda ojačevalnik enaka:

$$U_{rms_{ojačevalnik}} = \sqrt{U_{rms_{sistem}}^2 - U_{rms_{osciloskop}}^2} = \sqrt{3 \text{ mV}^2 - 0,8 \text{ mV}^2} = 2,9 \text{ mV}$$

PP vrednost šuma, ki ga doda ojačevalnik znaša 29 mV. Iz tega je možno izračunati PP vrednost mehanskega opletanja, ki dosega 8,8 nm. To je žal preveč.

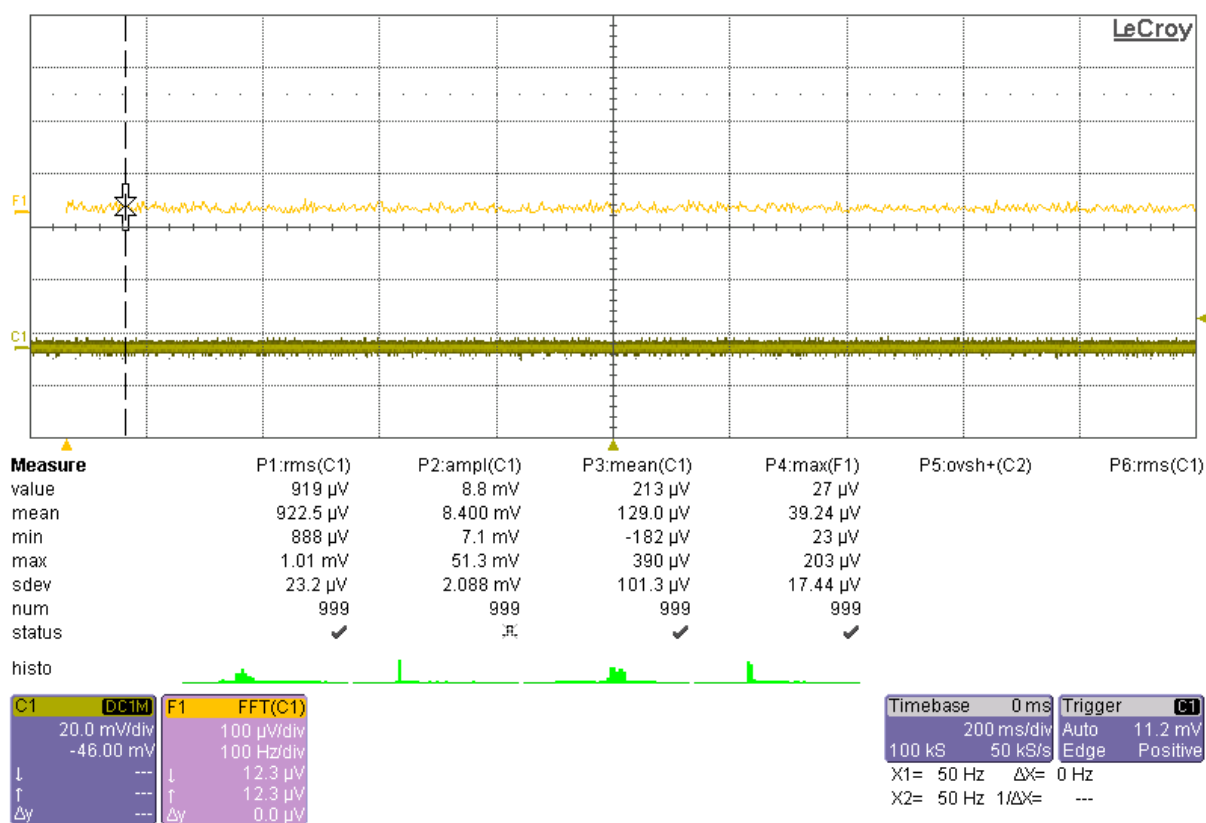
Ocenjena šumna gostota iz RMS vrednosti šuma in pasovne širine je torej:

$$V_n = \frac{V_{nrms}}{\sqrt{BW}} = \frac{3 \text{ mV}}{\sqrt{15 \text{ kHz}}} = 0,12 \frac{\text{mV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

Vršna vrednost šuma 0,1 mV (pomik s korakom 0,01 nm) predstavlja 0,01 mV RMS vrednosti šuma. Dovoljena pasovna širina bi v temu primeru znašala:

$$BW = \left(\frac{V_{rms}}{V_n}\right)^2 = \left(\frac{0,01 \text{ mV}}{0,12 \text{ mV}}\right)^2 \sqrt{\text{Hz}}^2 = 0,7 \text{ Hz}$$

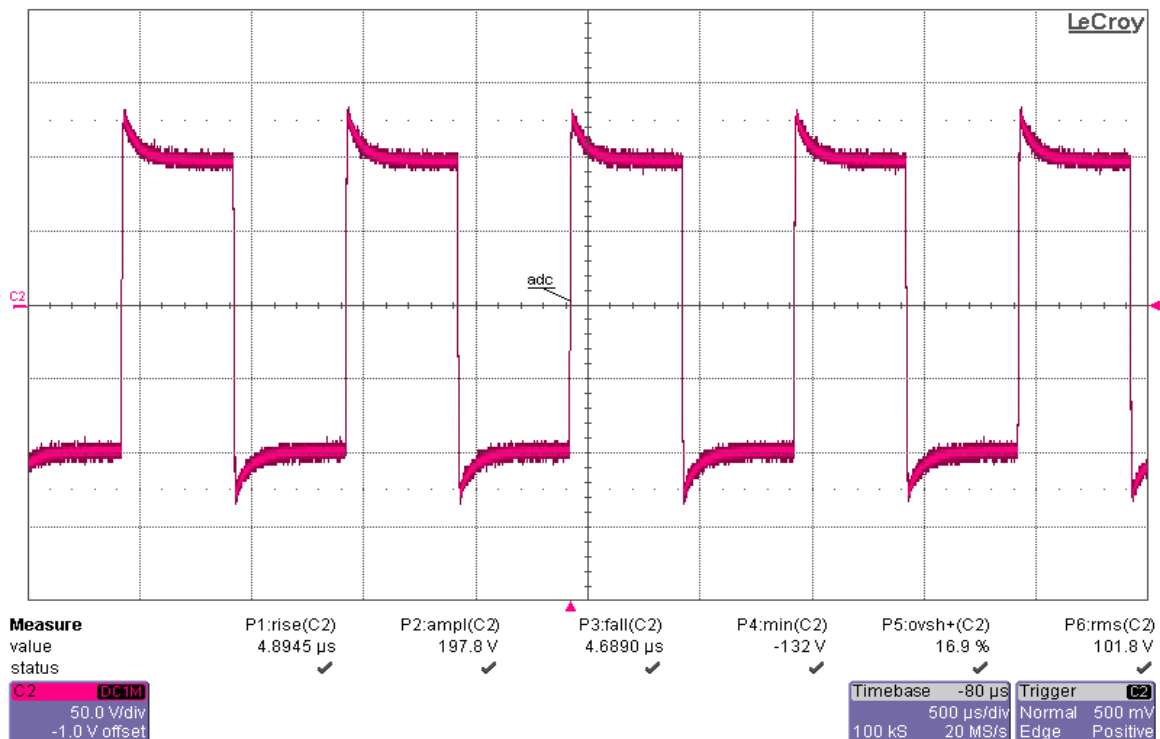
Izkazalo se je, da je v šumu ojačevalnika prisotna dokaj močna komponenta 50Hz, kar bi bilo potrebno odpraviti z boljšim filtriranjem tako preko magnetnega sklopa okolico, kakor tudi preko napajalnih linij. Prav tako bi bilo potrebno veliko bolje karakterizirati šumno karakteristiko ojačevalnika in ugotoviti posamezne šumne prispevke belega šuma, 1/f šuma in motenj.



Slika 12: Meritev šuma osciloskopa

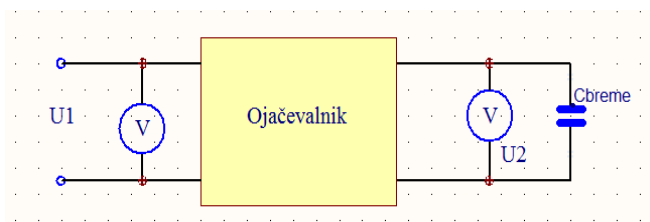
Meritve v časovnem prostoru

V časovnem prostoru je pomembno odzivanje ojačevalnika na vzbujanje. Odziv ojačevalnika brez bremena (slika 7) na pravokotne pulze je na sliki 13. Potrebno bi bilo nadkompenzirati povratno vezavo, saj ima odziv prevelik prenehaj.

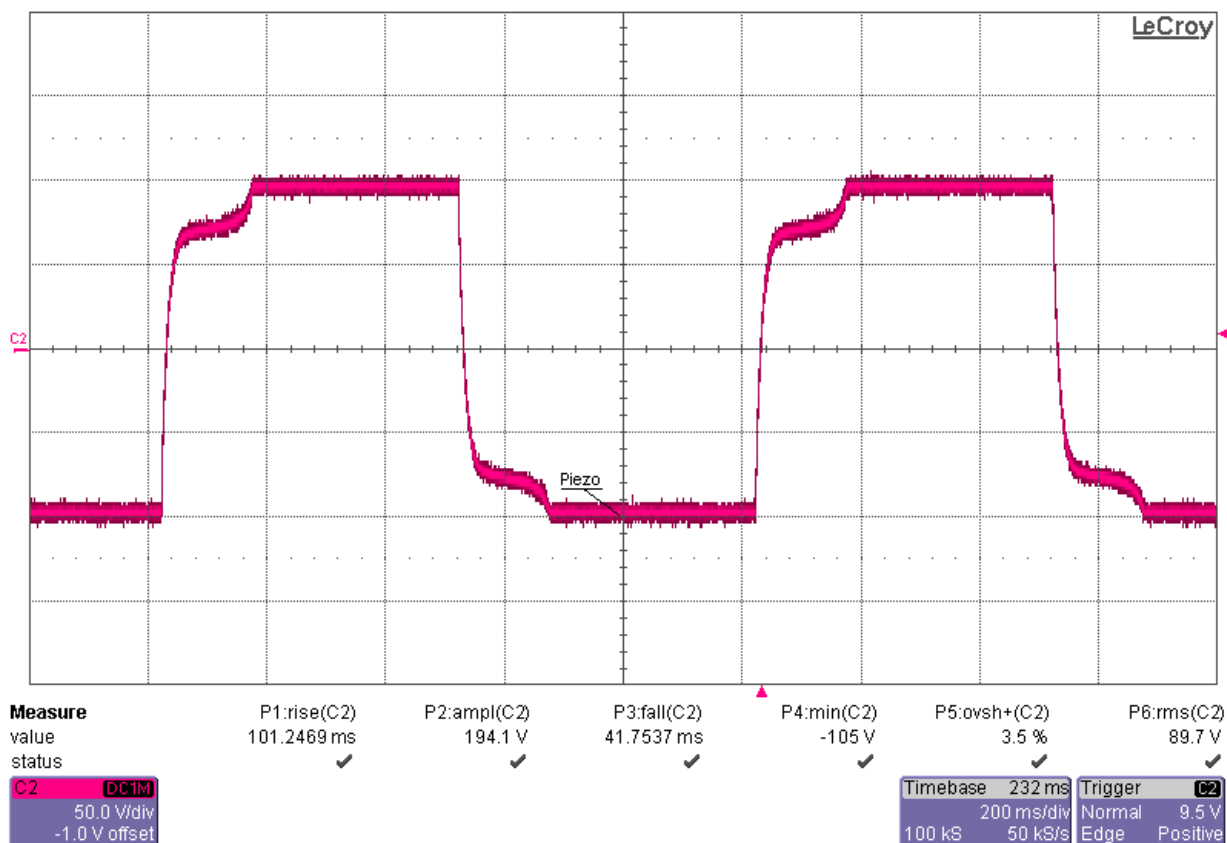


Slika 13: Odziv na vzbujanje s pravokotnimi signali brez bremena

Odziv ojačevalnika s priklopljenim piezo aktuatorjem (slika 14), ki se obnaša kot kondenzator s kapacitivnostjo približno 4,2 nF, je z istim vzbujanjem prikazan na sliki 15.

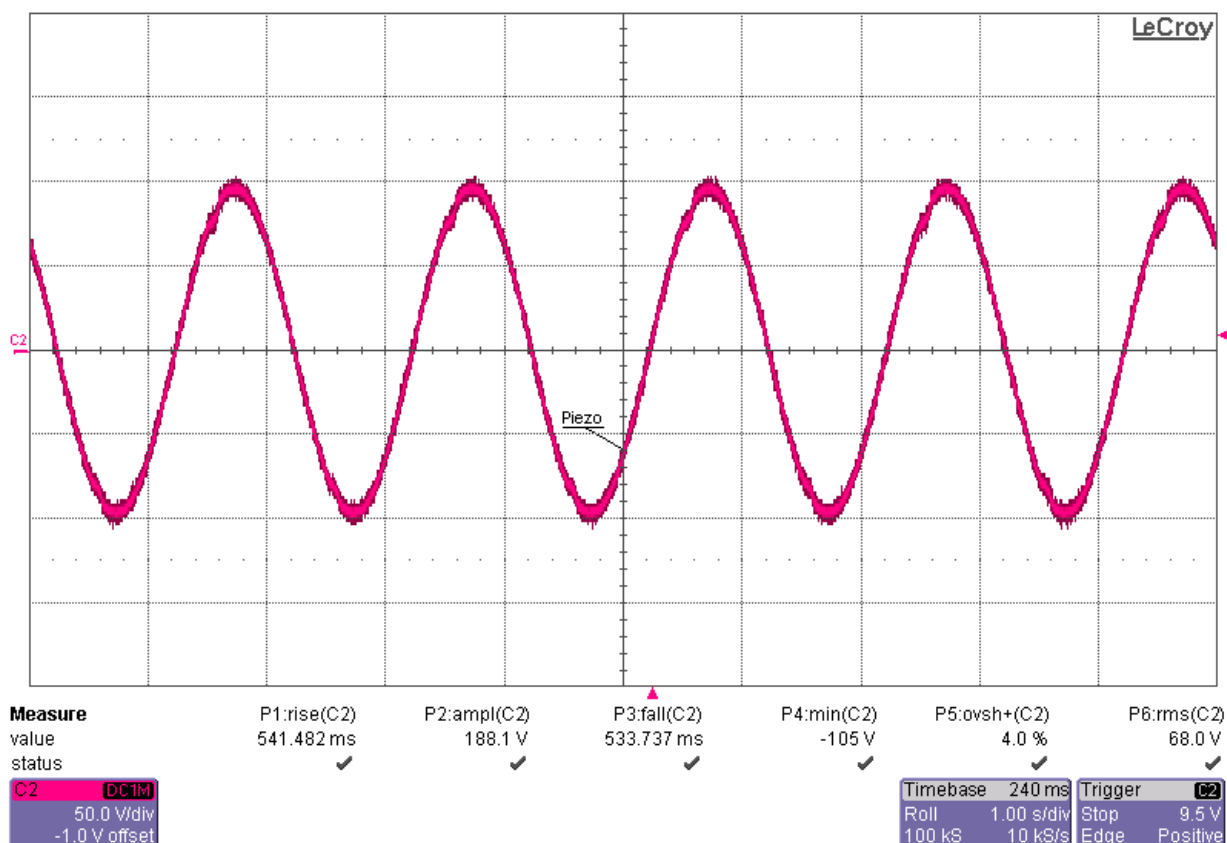


Slika 14: Obremenitev izhoda ojačevalnika z aktuatorjem



Slika 15: Odziv ojačevalnika na pravokotne pulze s priklopljenim piezo aktuatorjem

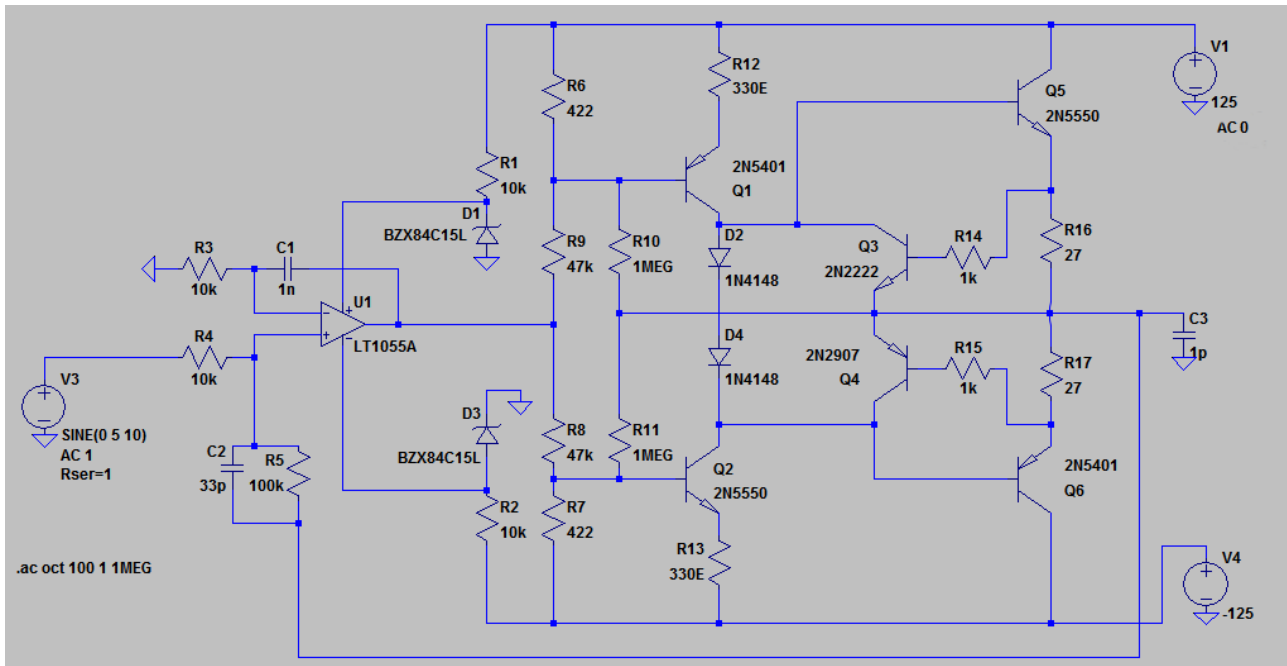
Pravokotno vzbujanje v aplikaciji ni mišljeno, prav tako ne sinusno vzbujanje, kakor je prikazano na sliki 16, saj so pomiki prehitri in preveliki za "tipanje" atomov. Spremembe v vzbujanju v aplikaciji bo v rangu maksimalno 100 mV/s na izhodu ojačevalnika.



Slika 16: Odziv ojačevalnika s sinusnim vzbujanjem s priklopljenim piezo aktuatorjem

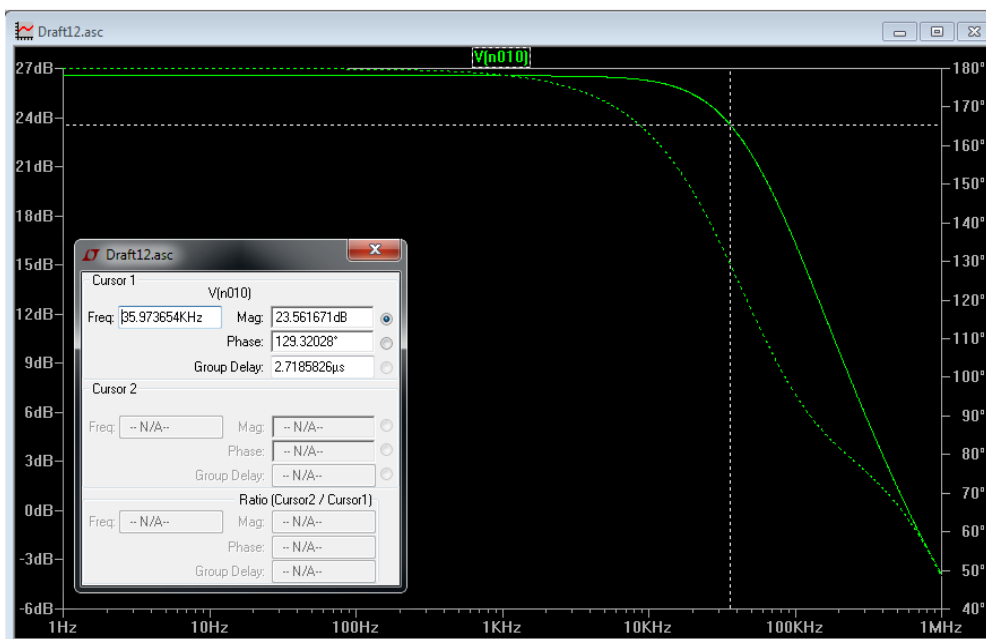
Simulacije v programu LTSpice

Za potrebe boljše analize je bil izdelan tudi simulacijski model vezja (slika 17), ki bo v pomoč pri analizi odziva na različna vzbujanja in različna bremena.



Slika 17: Shema ojačevalnika v programu LTSpice

Frekvenčni odziv brez bremena je prikazan na sliki 18 (signal prispeva vir V3). Mejna frekvenca nastopi pri 36kHz.

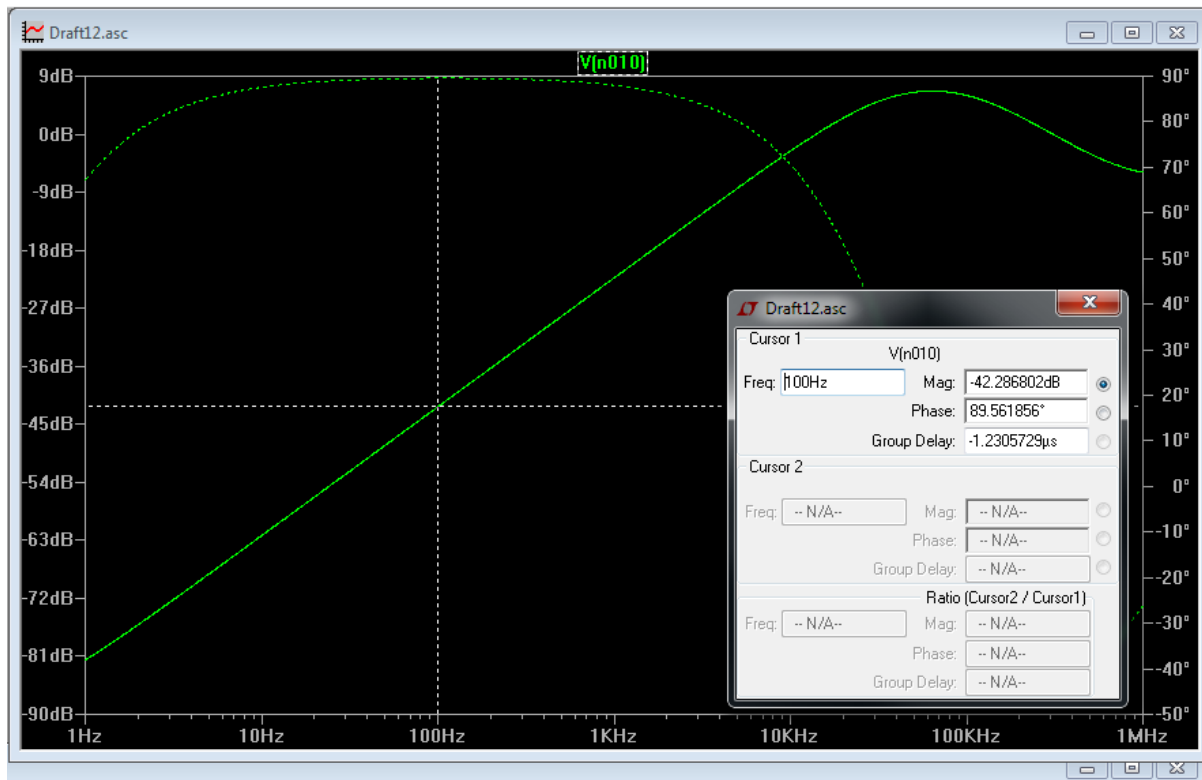


Slika 18: frekvenčni odziv ojačevalnika brez bremena

Izvedena je bila še simulacija dušenja motenj v napajalni liniji. Zaradi usmernika je v napajanju prisoten signal 100Hz ter njegove harmonske komponente. Z uporabo gladilnih kondenzatorjev 330 uF in porabo toka 15 mA, je nihanje napajalne napetosti po simulaciji približno 0,4 V. S faktorjem dušenja 42 dB pri frekvenci 100 Hz je nihanje izhodne napetosti iz ojačevalnika enako:

$$dU_{izh} = P_{SSR} \cdot dU_{nap} = -42\text{dB} \cdot 0,4\text{V} = 0,4\text{V} \cdot 10^{\frac{-42}{20}} = 0,4\text{V} \cdot 0,00794 = 3,2\text{mV}$$

Simulacija vezja glede odpornosti na injiciran signal (power rejection) v napajalno linijo je prikazan na sliki 19 (signal za AC analizo prispeva napetostni vir V1).



Slika 19: frekvenčna odvisnost dušenja motenj preko napajalne linije (PSSR)

Zaključek

Opisani ojačevalnik pogojno uporabljen za pogon piezo aktuatorja za mikroskop na podlagi atomske sile. Predvsem je potrebno ugotoviti vir šuma in ga ustrezno zmanjšati, v nasprotnem primeru bi bilo potrebno znova premisliti o kombinaciji aktuatorja in ojačevalnika. Meritev je dobro usklajena s simulacijo, tako, da je verjetno največji vir šuma nihanje napajalne napetosti. To bo potrebno v naslednjem koraku preveriti s stabiliziranim visokonapetostnim linearnim regulatorjem.

Željena pasovna širina bi lahko segla vse do 100 Hz, da so časi pozicioniranja čim krajši, višje hitrosti pa vsekakor omejuje meritev odklona tipala (pri mikroskopu na atomsko silo), oziroma meritev toka (pri tunelskem mikroskopu). Druga možnost je izbira aktuatorja, ki za isto spremembo napetosti naredi manjši premik - uporaba aktuatorja z enoslojnim piezo kristalom, npr. štiri kvadrantna piezo cevka.

Literatura

- [1]: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [2]: Bob Dobkin, Jim Williams; Analog Circuit Design, Volume 2, Immersion in the Black Art of Analog Design; Newnes - Elsevier/Linear technologies (stran 513, vezje 20.9)
- [3]: Paul Horowitz, Winfield Hill; The art of electronics - second edition, Cambridge university press (stran 1041)
- [4]: Victor Bellitto; Atomic force microscopy - Imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale; InTeOp 2012
- [5]: Paul Gray, Paul Hurst, Stephen Lewis, Robert Meyer; Analysis and design of analog integrated circuits - fourth edition; John Wiley & Sons 2001