



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Luka Spahić

**PROJEKTOVANJE I REALIZACIJA ELEKTRONSKOG SKLOPA ZA
MERENJE NISKIH STRUJA NA BAZI TRANSIMPEDANSNOG
POJAČANJA**

MASTER RAD

Studijski program: Elektronika i mikrosistemi

Kandidat:

Luka Spahić, br. ind. 984

Mentor:

Prof. dr Goran Ristić



Ovaj master rad urađen je u okviru ELICSIR projekta koji je finansiran od strane Horizont 2020 programa za istraživanja i inovacije Evropske Unije prema sporazumu o grantu broj 857558



www.elicsir.elfak.rs

Niš, septembar 2020. god.

Master rad

Projektovanje i realizacija elektronskog sklopa za merenje niskih struja na bazi transimpedansnog pojačanja

Zadatak: Projektovati i realizovati prototip elektronskog sklopa za merenje niskih struja na bazi transimpedansnog pojačanja. Pojačanje struje rešiti konverzijom struje u napon, tako da se na konačnom izlazu dobije napon u funkciji od merene struje na ulazu elektronskog sklopa. Detaljno opisati način rada samog elektronskog sklopa, navesti probleme, tehnička rešenja i njegovu primenu.

Student:

Luka Spahić, br. ind. 984

Datum prijave rada: 25.06.2020.

Datum predaje rada: 29.09.2020.

Datum odbrane rada: 02.10.2020.

Komisija za odbranu:

1. Prof. dr Goran Ristić

2. Doc. dr Ljubomir Vračar

3. Prof. dr Danijel Danković

Projektovanje i realizacija elektronskog sklopa za merenje niskih struja na bazi transimpedansnog pojačanja

SAŽETAK

Pojava električnog mernog instrumenta datira od trenutka otkrića dejstva mehaničkih sila između nosilaca naelektrisanja i otkrića uzajamnog dejstva elektriciteta i magnetizma. Instrumenti za merenje jednosmerne struje, poznati kao galvanometri, pojavljuju se nakon Erstedovog otkrića o uzajamnom dejstvu električnog i magnetnog polja, 1820. godine. Primenjeno konstruktivno rešenje galvanometra sa pokretnim kalemom u stalnom magnetnom polju datira iz 1881. godine, kao patentno rešenje Žaka Darsonvala.

Da bi se uspešno izmerila data veličina (struju reda veličine nA) mora se primeniti određena metoda merenja. Master rad prikazuje rešenje koje se bazira na konceptu transimpedansnog pojačanja i koje je izvedeno tako da se obezbedi visoka preciznost merenja uz maksimalnu moguću imunost na spoljašnj elektromagnetne smetnje.

Na samom početku rada dat je kratak istorijski opis razvoja načina merenja električne struje. Nakon toga, predstavljena je ideja realizacije elektronskog sklopa i dat pregled njegovih ključnih delova. Pojedinačno i detaljno je predstavljen način projektovanja električne šeme i njenih pojedinačnih delova, simulacija električne šeme, kao i detaljno projektovanje štampane ploče elektronskog sklopa. Zatim je urađeno merenje električne struje pomoću realizovanog prototipa elektronskog sklopa i diskusija rezultata merenja.

Na kraju rada dat je predlog konkretne primene elektronskog sklopa za merenje niskih nivoa struje, unapređenja funkcionalnosti, kao i potencijalni propusti i njihovo otklanjanje. Takođe, elektronsko kolo omogućava pojačanje i konverziju generisane fotostruje u napon usled dejstva jonizujućeg zračenja na PIN fotodiodu. Na osnovu izmerene struje moguće je izračunati apsorbovanu dozu jonizujućeg zračenja.

Ključne reči: Merenje jednosmerne struje, transimpedansno pojačanje, simulacija, rezultati merenja

Design and implementation of an electronic circuit for measuring low currents based on transimpedance amplification

ABSTRACT

The appearance of the electric measuring instrument dates from the moment of the discovery of the action of mechanical forces between the charge carriers and the discovery of the interaction of electricity and magnetism. Instruments for measuring direct current, known as galvanometers, appeared after Ersted's discovery of the interaction of electric and magnetic fields in 1820. The applied design of a galvanometer with a moving coil in a constant magnetic field dates from 1881, as a patent solution of Jacques Darsonval.

In order to successfully measure a given current quantity (current level of nA), it must be applied a certain measurement method. The master's thesis presents a solution based on the concept of transimpedance amplification and which is designed to ensure high as possible measurement accuracy with maximum immunity to external electromagnetic interference.

At the beginning of the thesis, a brief historical description of the development of the method of measuring electric current is given. Furthermore, the idea of the electronic circuit realization is presented and an overview of its key parts is given. As part of the thesis, the electrical circuit design method and its individual parts, simulation of the electrical circuit, as well as detailed design of the printed circuit board of the electronic circuit are presented in details.

After that, the measurements of the electric current were done by realized prototype and the discussion of the measurement results was presented.

At the end, a proposal for the electronic circuit application for measuring low current levels, improvement of functionality, as well as potential omissions and their elimination are given. Also, the electronic circuit enables amplification and conversion of generated photocurrents into voltage due to PIN diode irradiation. Based on the measured current, it is possible to calculate the absorbed dose of ionizing radiation.

Keywords: Direct current measurement, transimpedance amplification, simulation, measurement results

SADRŽAJ

1	UVOD.....	6
1.1	Istorijski razvoj uređaja za merenje struje.....	6
2	ELEKTRONSKI SKLOP ZA MERENJE NISKIH NIVOVA STRUJE	12
2.1	Osnovni princip rada elektronskog kola.....	12
2.2	Primena elektronskog sklopa.....	13
3	FUNKCIONALNE CELINE	15
3.1	Napajanje.....	15
3.2	Predpojačavač.....	17
3.2.1	Stabilnost TIA operacionog pojačavača.....	20
3.2.2	Električna šema predpojačavača.....	23
3.3	Instrumentacioni pojačavač.....	26
3.4	Električna šema.....	29
4	PROJEKTOVANJE ŠTAMPANE PLOČE	30
4.1	Planarne transmisionne linije.....	30
4.2	Prilagođenje impedanse.....	32
4.3	Projektovanje <i>layout</i> -a štampane ploče.....	34
5	POSTAVKA MERENJA I REZULATI.....	40
5.1	Kratak opis načina povezivanja elektronskog sklopa sa mernom opremom i korišćenja <i>Windows</i> aplikacije.....	40
5.2	Rezultati merenja.....	43
6	ZAKLJUČAK	53
	LITERATURA	54

GLAVA 1

1 UVOD

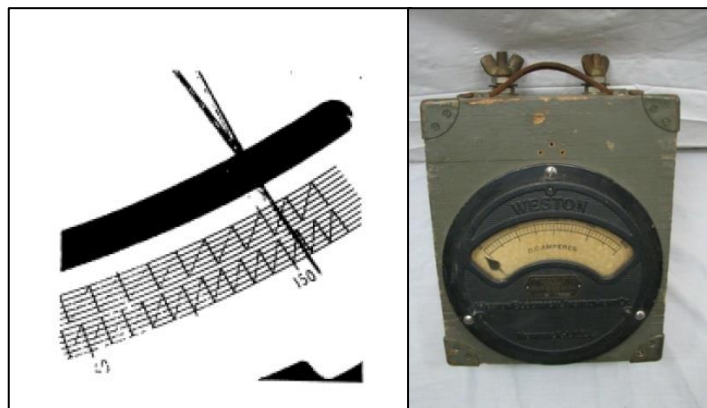
„Merenje je metoda dodele kvantitativnih mernih jedinica određenoj veličini. Rezultat merenja je kvantitativna procena merene veličine koja uključuje predstavljanje metode merenja i informaciju o validnosti rezultata merenja (mernoj nesigurnosti). Rezultat merenja, praktično, predstavlja najbolju estimaciju (tj. procenu) merene vrednosti, a može biti i njena aproksimacija.“ [1]

1.1 Istorijski razvoj uređaja za merenje struje

Pojava električnog mernog instrumenta datira od trenutka otkrića dejstva mehaničkih sila između nosilaca naelektrisanja (elektroskop za registrovanje količine elektriciteta) i otkrića uzajamnog dejstva električnog i magnetnog polja (galvanometri sa torzionom niti).

Otkrićem električne baterije 1800. godine, zatim, elektromagnetizma 1820. godine, konačno je omogućilo proučavanje i merenje električne struje. Količina električne energije sada se može pravilno meriti elektrolizom uzimajući u obzir količinu gasa koja nastaje iz elektrode ili masu metala koji na njoj nastao. Kasnije bi se intenzitet struje procenio njegovim delovanjem na magnetnu iglu ili na drugi električni krug.

Kada se elektroenergetska industrija počela razvijati u drugoj polovini 19. veka, struju i napon je trebalo redovno meriti. Jedan od inženjera koji je precizni DC ampermetar koristio u praktičnu upotrebu bio je Edvard Veston (1850-1936).

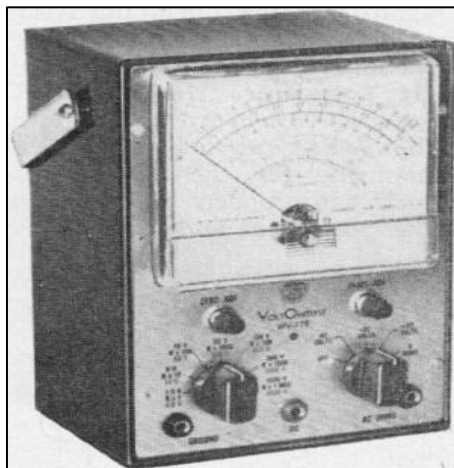


Slika 1.1 – Vestonov prenosivi merač: pokretna zavojnica, stalni magnet i indikator [2]

Brojač je nazvao prenosnim instrumentom, jer su se električna brojila do tada mogla koristiti samo u laboratoriji i nisu se mogla nigde prevoziti da bi se izvršila merenja. Veston je imao za cilj da napravi visoko pouzdan merni uređaj sa vrednošću napona očitanom odmah sa skale. Upotrebio je stalni magnet i ostvario jednako magnetno polje u pokretnom delu zavojnice. Zatim su korišćene zavojnice četvrtastog okvira, nosači za okretanje i dve opruge, prolazeći kroz struju zavojnice. Na vrh zavojnice je bio pričvršćen indikator. Veston je 1886. godine dovršio prenosni jednosmerni ampermetar sa tačnošću od 0,5 %, a zatim je imao za ideju da stvori ampermetar za velike struje i AC metar. [2]

H. S. Black (1898.-1983.) osmislio je negativnu povratnu spregu 1927. godine proučavanjem pojačavanja nosećeg signala u telefoniji u *Bell* laboratoriji. Ovakvom spregom poboljšao je stabilnost pojačanja i njegovu nelinearnu prirodu, a uspostavljen je i put do kvantitativnih mernih instrumenata. Štaviše, *A. D. Blumlein* (1903-1942) je 1936. otkrio diferencijalno pojačanje i time ostvario stabilnije pojačanje.

Negativna povratna sprega i diferencijalna kola zahtevala su mnogo vakumskih cevi¹. Međutim, pedesetih godina 20. veka, realizovan je mali voltmetar koji se sastojao od vakumskih cevi. Merni uređaj je postao jednostavniji za upotrebu jer je stvorena linearna skala pomoću negativne povratne sprege.



Slika 1.2 – Spoljašnji izgled voltmetra napravljen 1959. godine od vakumskih cevi [4]

¹ Vakuumska cev je uređaj koji se koristi za kontrolu protoka električne struje pomoću vakuuma u zatvorenoj posudi, koji obično ima oblik staklene cevi. Vakuumska cev je preteča modernog tranzistora i koristila se na slične načine kao elektronski kontrolisani prekidači, ispravljač, pojačavač i na druge razne načine na koje se danas koriste tranzistori.

Dvostruki nagibni analogno-digitalni elektronski uređaj, razvijen 1957. godine, bio je odlično rešenje za merne instrumente. Ovaj uređaj karakteriše dramatično smanjenje šuma frekvencije koja postoji u blizini i sposobnost da izvodi stabilno digitalno merenje.

Rosevell Gilbert (1909. – 1994.) osmislio je kolo, ali ga tada nije mogao koristiti za praktičnu upotrebu, jer je A/D pretvarač sastavljen od vakumskih cevi bio veliki koliko i fioka od stola.

Sedamdesetih godina prošlog veka, kada je cena poluprovodika opala, analogno-digitalni elektronski uređaj za merenje je prvi put stavljen u upotrebu. Dimenzije komplikovanog električnog kola smanjena je upotrebom tranzistora i integrisanih kola.

Tokom 1980-ih, posebno, komplikovana električna kola postala su mala, jeftina i vrlo pouzdana. Digitalni voltmetar koristi brojne male elektronske delove i prateće komponente, uključujući otpornike, kondenzatore i tranzistore.

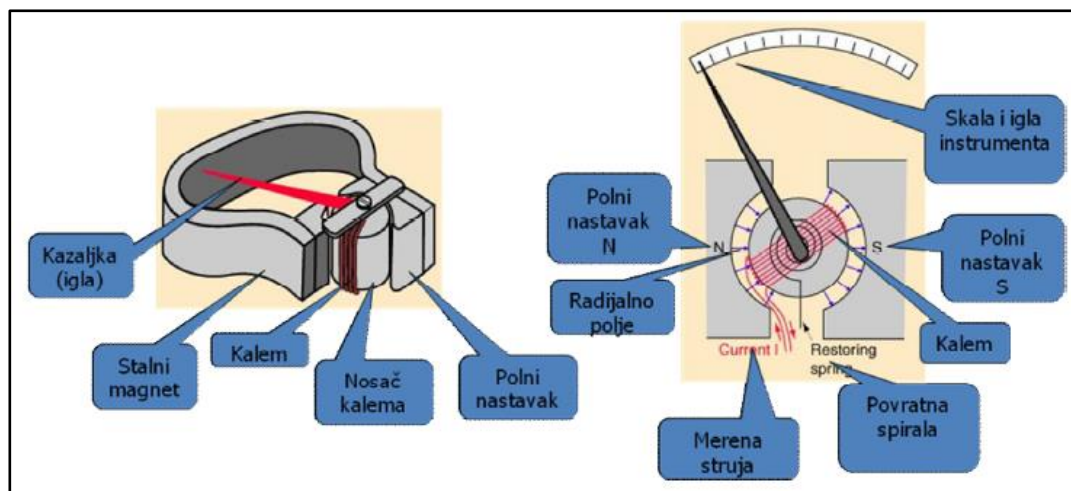
Današnji uređaji za merenje električnih veličina – digitalni multimetri kombinuju mogućnosti testiranja merenja sa jednim zadatkom – voltmetara (za merenje napona), ampermetra (struja) i om-metra (električni otpor). Često uključuju nekoliko dodatnih specijalizovanih funkcija ili naprednih opcija.



Slika 1.3 – Ilustracija razvoja instrumenata za merenje električnih veličina [5]

Preteča svih modernih instrumenata za merenje veoma niskih nivoa struja jeste galvanometar². Najčešće se primenjuje u laboratorijama za merenje površinskih struja, termonapona, velikih izolacijskih otpora i kao nul-indikator (nulti položaj je u sredini skale). Za merenje jednosmernih struja postoje dva tipa galvanometra: sa pomičnim kalemom i pomičnim magnetom. Naziv je dobio po naučniku Luidiju Galvaniju (1737. – 1798.), a njenu pojavu objasnio je Aleksandro Volta (1745 – 1829.) 1794. godine, koji je i tvorac prvih izvora galvanske struje, Voltinih elemenata.

Princip rada instrumenta sa pokretnim kalemom zasniva se na uzajamnom dejstvu sila radijalnog magnetnog polja i polja merene električne struje koja teče kroz rotirajući kalem. Konstruktivni oblik instrumenta sa kretnim kalemom prikazan je na slici 1.2. Polni nastavci stalnog magneta (N, S) oblikovani su tako da se u cilindričnom međuprostoru, oko kretnog kalema, formira radijalno magnetno polje. Kalem je preko osovinice postavljen u ležištima i povezan je sa spiralnim oprugama, kojima se obezbeđuje referentni spreg momenata M_0 , koji se suprotstavlja dejstvu aktivnog sprega merene struje M_a . Osovina sa kazaljkom je pomoću spiralnih opruga postavljena u nulti ravnotežni položaj. Priključni vodovi kalema vezani su preko spiralnih opruga ili posredstvom kliznih metalnih prstenova na osovini.[3]



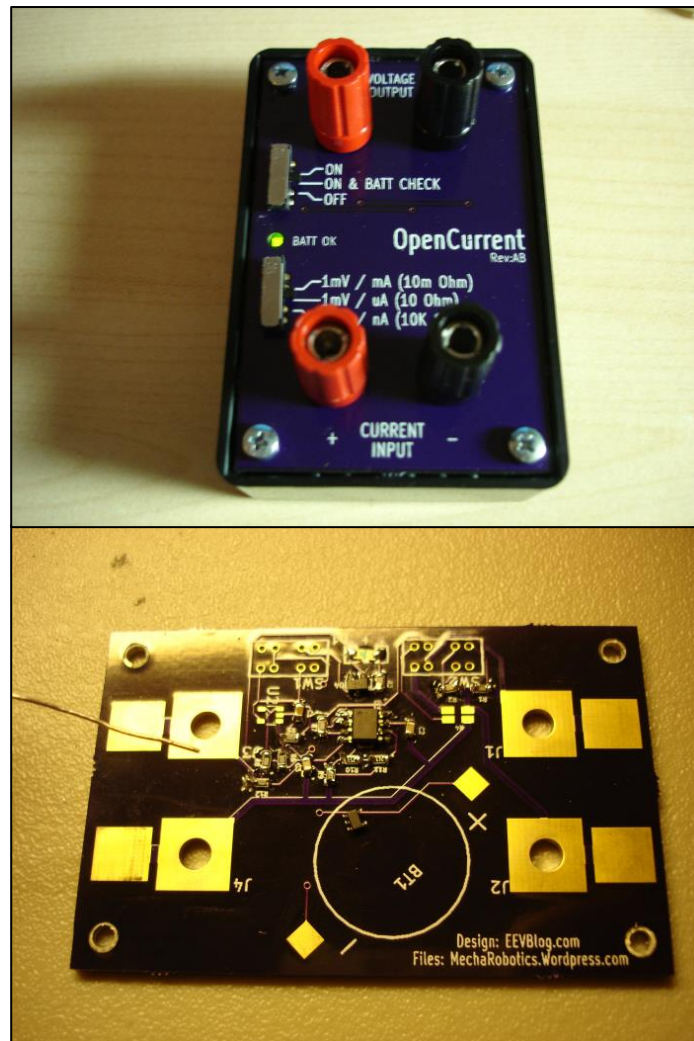
Slika 1.4 – Konstrukcija mernog instrumenta sa pokretnim kalemom u stalnom magnetnom polju – Ilustracija [3]

² Galvanometar jeste instrument za detektovanje postojanja niskih vrednosti struje i merenje njene amplitude. Posebna osobina galvanometra je i mogućnost deflekcije kazaljke ili igle u dva smera, u zavisnosti od smera proticanja merene struje. U literaturi se može naći i kao galvanometar sa pokretnim kalemom u stalnom magnetnom polju.

Uglavnom se ova vrsta pojačavača koristi kao ulazni stepen pojačanja (predpojačavač) celokupnog elektronskog sklopa. Ono što je bitno je to da se takvi pojačavači izrađuju kao integrisana kola visokih performansi smeštena u SMD kućište malih dimenzija.

Na slici 1.6 je prikazan primer elektronskog sklopa za merenje električne struje, gde se na ulazu dovodi struja, a na izlazu se očitava napon proporcionalan ulaznoj struji.

Takođe, ovde je moguće i podesiti opseg merenja struje reda veličine mA, μ A i nA.



Slika 1.6 – Spoljašnji (gore) i unutrašnji (dole) izgled elektronskog sklopa [6]

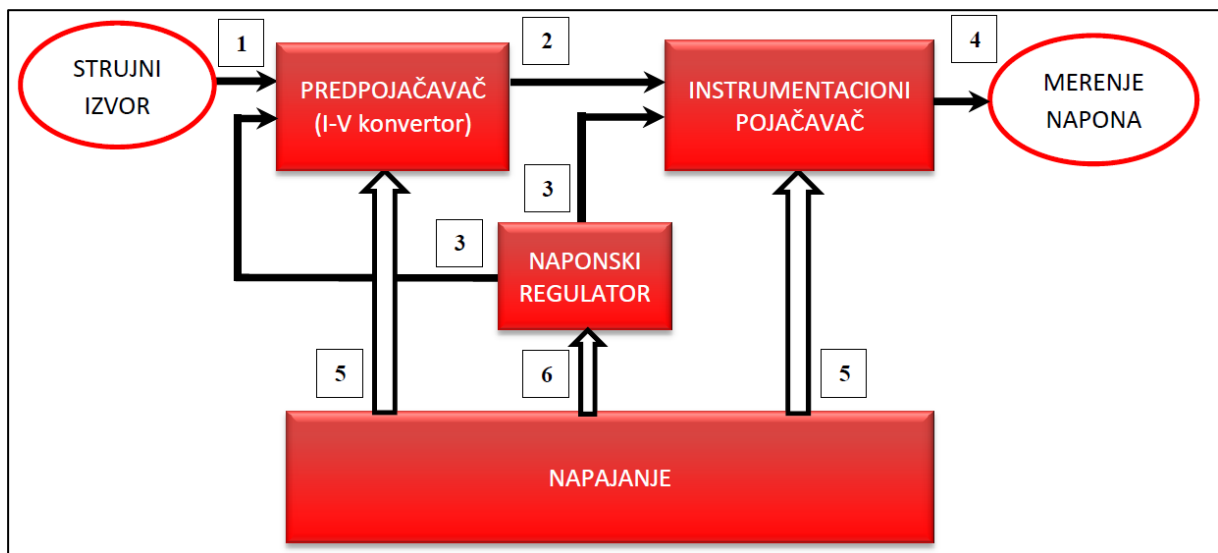
GLAVA 2

2 ELEKTRONSKI SKLOP ZA MERENJE NISKIH NIVOVA STRUJE

U daljem tekstu biće predstavljen blok dijagram i ukratko objašnjen princip rada elektronskog sklopa.

2.1 Osnovni princip rada elektronskog kola

Na slici 2.1 dat je blok dijagram projektovanog elektronskog sklopa koji se sastoji od: ulaznog predpojačavača, instrumentacionog pojačavača, naponskog regulatora i bloka preko koga se eksterno dovodi dvostani izvor napona napajanja.



Slika 2.1 – Blok dijagram projektovanog elektronskog sklopa

Posmatranjem slike 2.1 može se uočiti da se na ulazu (1) dovodi signal sa strujnog izvora. Taj signal jeste struja koju treba izmeriti. Merena struja se dovodi na invertujući ulaz predpojačavačkog bloka. Zajedno sa njim, na neinvertujući ulaz predpojačavača dovodi se referentni napon (3) sa naponskog regulatora. Predpojačavački blok čini transimpedansni pojačavač koji pojačava strujni signal, idealno bez pojačanja šuma. U istom bloku, radi lakše obrade signala, merena struja se konvertuje u napon. Izlaz predpojačavačkog bloka (2) se dalje vodi na invertujući ulaz instrumentacionog pojačavača. Isto tako, izlazni napon sa naponskog regulatora (3) se dovodi i na neinvertujući ulaz instrumentacionog pojačavača.

Referentni napon na neinvertujućem ulazu prvog stepena (predpojačavača) predstavlja dobro rešenje sa aspekta stabilnosti pojačanja umesto korišćenja nulte referentne tačke (mase). Dovedeni napon sa naponskog regulatora na neinvertujući ulaz predpojačavača se oduzima u instrumentacionom pojačavaču čime se obezbeđuje očuvanje korisnog signala. [7]

Na samom izlazu instrumentacionog pojačavača (4) nalazi se precizni merni instrument kojim se meri trenutni odziv izlaznog napona na strujnu pobudu na ulazu (1).

Napajanje celokupnog elektronskog kola je eksterno i dvostrano³. Ovaj tip napajanja je odabran jer je preporučen od strane proizvođača pojačavača koji su korišteni u ovom radu. Kao što se vidi na slici 2.1 oba pojačavača se napajaju dvostrano (5). Napon koji se dovodi na neinvertujućim ulazima pojačavača (3) značajno je manji od napona napajanja, pa ga je potrebno smanjiti. Za smanjenje napona korišćen je naponski regulator na čijem ulazu (6) se dovodi pozitivni napon dvostranog napajanja, a na njegovom izlazu (3) dobija se stabilni napon manje amplitude od pozitivnog napona dvostranog napajanja. Bitno je napomenuti da elektronski sklop, odnosno svi njegovi osetljivi delovi moraju biti oklopljeni da bi se elektronsko kolo zaštitilo od visoko frekventnih EM smetnji.

2.2 Primena elektronskog sklopa

Profesionalna elektronska kola i uređaji koji imaju mogućnost merenja veoma malih struja reda veličine nano-ampera, piko-ampera, pa čak i femto-ampera nazivaju se još i elektrometrima.

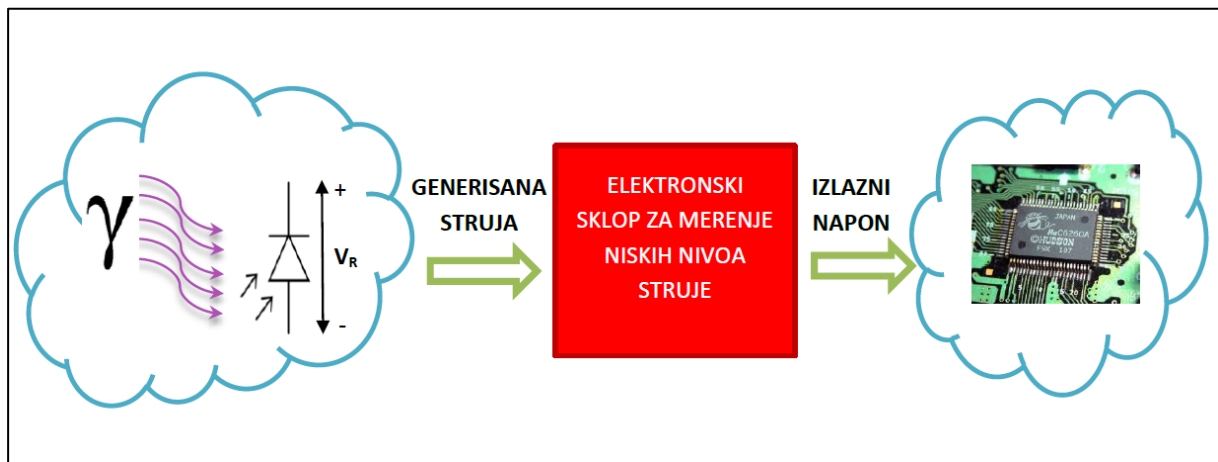
U mnogim dozimetrijskim aplikacijama postoji potreba za merenjem veoma niskih jednosmernih struja, u opsegu od nekoliko pA do nekoliko μA , nastalih od strane jonizujućeg zračenja.

Praktična primena je u dozimetrijskim sistemima u kojima se kao detektori koriste PIN fotodiode, jonizacione komore, kao i dozimetrijski sistemi zasnovani na tehnikama termoluminescencije i optički stimulisane luminiscencije.

Ako bi npr. primenili inverzno polarisanu PIN fotodiodu kao detektor jonizujućeg zračenja, moramo imati na umu da kada zračenje pogodi osiromašenu oblast $p-n$ spoja dolazi do generacije para elektron-šupljina. Par biva razdvojen usled vektora jačine električnog polja

³ Dvostrano napajanje (eng. *dual power supply*) je određeno napajanje iz jednog izvora koje ima tri priključka, jedno je pozitivan napon, drugo je negativan napon, a treće je uzemljenje.

nastalog od napona inverzne polarizacije. U tom trenutku dolazi do protoka naelektrisanja i detektovanja električne struje koja je proporcionalana energiji fotona.



Slika 2.2 – Ilustracija moguće primene elektronskog sklopa opisanog u radu

Primenom elektronskog sklopa, opisanog u radu, na izlazu dobijamo napon proporcionalan generisanoj ulaznoj struji. Dalje se taj napon reda mV ili V može dovesti na sistem za akviziciju i obradu podataka. Korišćenjem određenih matematičkih funkcija može izračunati apsorbirana doza primljenog zračenja. Veoma je bitno dobro projektovati stabilnost rada pojačavača, dizajn štampane ploče, kao i odabir odgovarajućih elektronskih komponenti.

Ovo je samo jedna od raznih mogućih primena elektronskog sklopa, pa tako se može iskoristiti za: merenje struja potrošnje mikrokontrolera, koristiti kao deo uređaja za određivanje pH vrednosti tečnosti ili određivanje intenziteta svetlosti i dr.

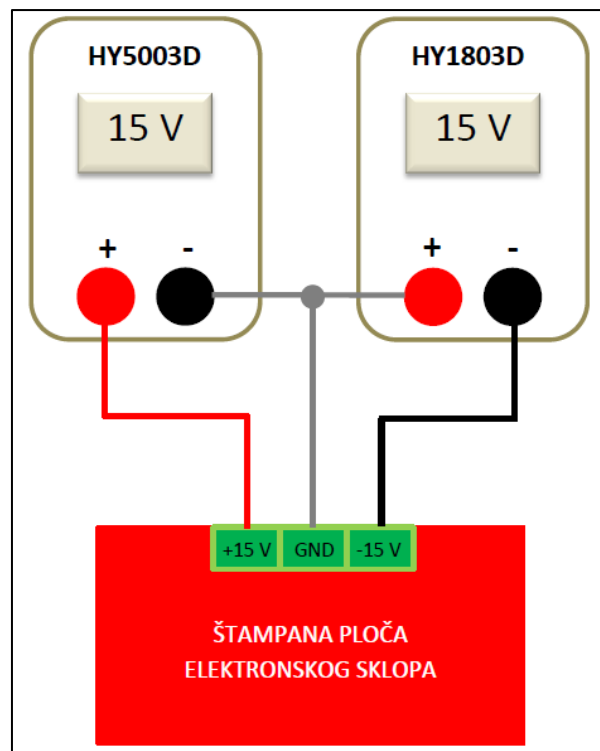
GLAVA 3

3 FUNKCIONALNE CELINE

Elektronski sklop se sastoji od četiri funkcionalna bloka. U ovom poglavlju opisan je detaljan rad i funkcionisanje svakog dela elektronskog sklopa kao i povezanost između njih.

3.1 Napajanje

Elektronski sklop poseduje konektor za napajanje sa tri priključka: pozitivan napon, negativan napon i uzemljenje. Ovakav tip napajanja se naziva dvostrano napajanje, a koristi se za napajanje operacionih pojačavača prema preporuci proizvođača. Da bi se ostvarilo dvostrano napajanje izvori moraju biti povezani kao na slici 3.1.

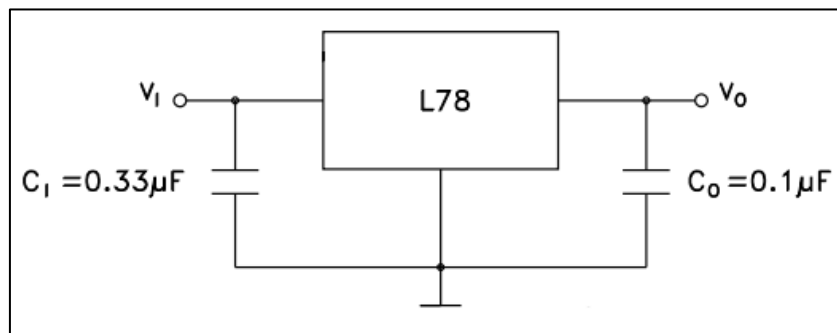


Slika 3.1 – Ilustrovani način povezivanja dvostranog DC izvora napajanja na konektore elektronskog sklopa

U laboratoriji su korišćena dva linearna izvora jednosmernog napona: *HYELEC DC POWER SUPPLY HY5003D* kao izvor pozitivnog napona napajanja u vrednosti od +15 V i *HYELEC DC POWER SUPPLY HY1803D* kao izvor negativnog napona napajanja u vrednosti

od -15 V. Uzemljenje, odnosno *common ground* je realizovano tako što su minus priključak *HYELEC DC POWER SUPPLY HY5003D* i plus priključak *HYELEC DC POWER SUPPLY HY1803D* kratko spojeni i tako dovedeni na priključak za uzemljenje elektronskog sklopa.

Zbog potrebe obezbeđivanja stabilnog jednosmernog napona koji se dovodi na neinvertujuće pinove predpojačavača i instrumentacionog pojačavača, upotrebljen je naponski regulator *LM7805* [9]. Na ulaz naponskog regulatora se dovodi +15 V, a na izlazu dobijamo stabilnih +5 V. Na slici 3.2 je data preporučena električna šema povezivanja naponskog regulatora od strane njegovog proizvođača.



Slika 3.2 – Električna šema povezivanja naponskog regulatora LM7805 [9]

Za sve naponske regulatore karakterističan je minimalni pad napona na regulatoru za koji se garantuje stabilna vrednost izlaznog napona:

$$V_I \geq V_O + V_d \quad (1)$$

Prema izrazu (1) se izračunava minimalni ulazni napon V_I da bi se obezbedio stabilan izlazni napon V_O vrednosti 5 V, a poznato je da je V_d pad napona na regulatoru 2 V.

Pošto je naš ulazni napon $V_I = 15$ V, a zbir napona V_O i V_d je 7 V, sledi da je formula (1) zadovoljena i da će naponski regulator davati na izlazu stabilan napon od 5 V.

Po preporuci proizvođača ulazni C_1^4 kondenzator treba da obezbedi dobre frekvencijske karakteristike i stabilan rad naponskog regulatora za sve vrste izlaznog opterećenja. Treba izabrati tantalski kondenzator sa malom ulaznom impedansom na visokim frekvencijama i montirati ga što bliže regulatoru. C_0 nije potreban za stabilnost rada, ali dodatno poboljšava tranzijentni odziv.

⁴ Kondenzator na ulazu naponskog regulatora često se u literaturi može naći pod nazivom *bypass* kondenzator, a namena mu je da filtrira visoke učestanosti.

3.2 Predpojačavač

Predpojačavač je elektronsko kolo koje pretvara slab električni signal u izlazni signal dovoljno veliki da bude tolerantan na šum i dovoljno veliki za dalju obradu ili za dodatno pojačanje.

Pre svega, da bi smo uspešno izmerili struju reda veličine nA, moramo primeniti određenu metodu merenja. U našem slučaju odlučujemo se za rešenje bazirano na konceptu transimpedansnog pojačanja. Izvedeno je tako da se obezbedi visoka preciznost merenja uz maksimalnu imunost na spoljne elektromagnetne smetnje.

Merenje niskih nivoa jednosmerne struje se izvodi konverzijom struje u napon, uz određenu proporciju između dobijenog napona i ulazne struje. U širokoj upotrebi su dve različite tehnike konverzije struje u napon koje se baziraju na primeni operacionog pojačavača: transimpedansno pojačanje i integraciono pojačanje.

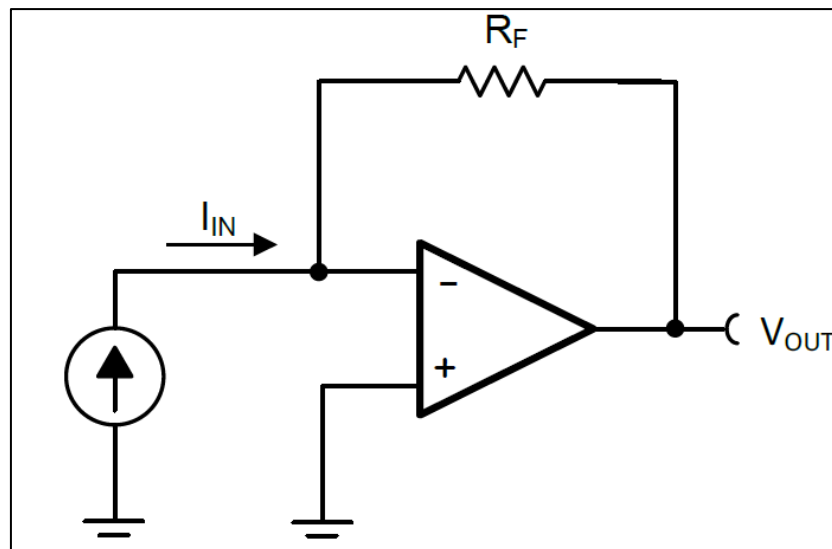
U master radu, kao primarna komponenta pojačanja (u okviru bloka predpojačavača) iskorišćena je elektronska komponenta specifične namene – transimpedansni operacioni pojačavač (eng. *Transimpedance Operational Amplifier*).

Transimpedansni pojačavači se obično koriste za pojačanje struje generisane od detektovanog svetlosnog zračenja na fotodiodi, pojačanje struje generisane od strane PIN diode ozračene gama zracima, itd... Ovakvi elektronski sklopovi su naizgled jednostavni. Pravilan dizajn jednog napajajućeg fotodiodnog pojačanja zahteva uvažavanje mnogih faktora, uključujući stabilnost pojačavača i ograničenja raspona ulaznog i izlaznog napona. Efekti greške izvora jednosmerne struje kao što su ulazna struja (eng. *Input Bias current*) i ulazni *offset* napona često se ignorišu i mogu pogoršati vremenski odziv i stabilnost ovih kola. U najprostijoj mogućoj formi, transimpedansni pojačavač se sastoji od operacionog pojačavača i otpornika u negativnoj povratnoj sprezi.[10] Struja koja se pojačava se dovodi na invertujući ulaz, izazivajući promenu izlaznog napona prema formuli (1):

$$V_{OUT} = -R_f I_{IN} \quad (1)$$

gde je R_f otpornik u povratnoj sprezi, I_{IN} ulazna struja koja se treba pojačati, a V_{OUT} izlazni napon direktno proporcionalan struji I_{IN} .

Na slici 3.3 prikazano je uprošćena električna šema transimpedansnog operacionog pojačavača.



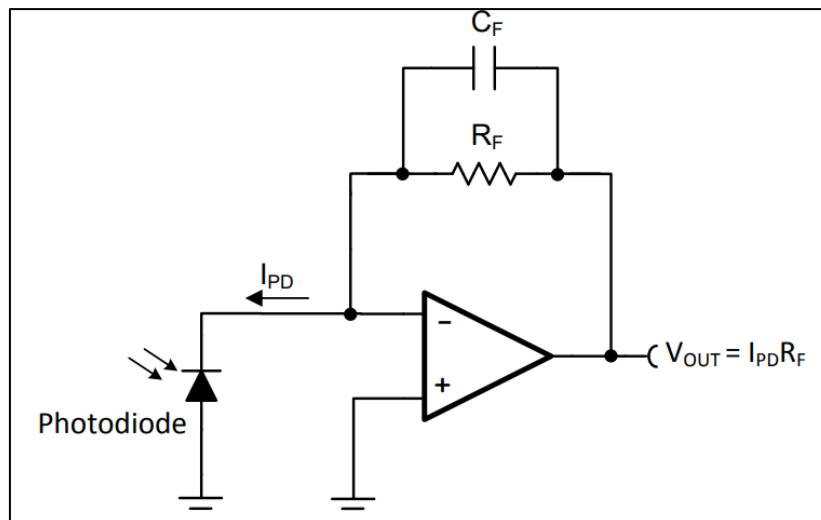
Slika 3.3 – Uproščena šema transimpedansnog pojačavača [10]

Radi kasnijih razmatranja i projektovanja umesto idealnog strujnog generatora, nadalje će biti predstavljena fotodioda u fotoprovodnom režimu⁵.

Na slici 3.4, otpornik u povratnoj sprezi R_F određuje pojačanje transimpedansog operacionog pojačavača, a povratnim kondenzatorom C_F se definiše širina frekventnog opsega zatvorene petlje. Dioda je polarisana u fotoprovodnom režimu.

Pored toga, potreban je povratni kondenzator C_F zbog stabilnosti, a i koristi se za kompenzaciju ukupne parazitne kapacitivnosti C_T na invertujućem ulazu pojačavača: kapacitivnost spoja fotodiode C_J i ulazna kapacitivnost pojačavača ($C_{DIFF} + C_{CM}$).

⁵ U fotoprovodnom režimu (eng. *photoconductive mode*) dioda je inverzno polarisana, to jest katoda je vezana na pozitivni potencijal napona u odnosu na anodu. U fotoprovodnom režimu je odziv fotodiode na upadnu svetlost brži nego u fotonaponskom režimu jer je kapacitivnost p–n spoja manja. Zbog toga je i ukupna RC konstanta kola manja. [11]



Slika 3.4 – Način povezivanja fotodiode u fotoprovodnom režimu sa uprošćenom električnom šemom transimpedansnog operacionog pojačavača [10]

Treba obratiti pažnju da iako imamo kondenzator C_F u povratnoj sprezi, ovakva konfiguracija ne predstavlja pojačavač na bazi integracionog pojačanja, već se ovim načinom rešava problem sa parazitnom kapacitivnošću fotodiode i definiše širina frekventnog opsega. Dalje nam ostaje problem stabilnosti rada samog pojačavača.

Pri izboru transimpedansnog pojačavača – TIA važno je razmotriti tri faktora koja diktiraju minimalno pojačanje za dati frekventni opseg f_{GBW} , a neophodna su za stabilnost kola:

- Strujno-naponsko pojačanje pojačavača, frekventni opseg zatvorene petlje i parazitna kapacitivnost spoja fotodiode.
- Stabilnost operacionog pojačavača je povezana sa pojačanjem u zatvorenoj petlji faznim odzivom frekvencije.
- Pojačanje zatvorene petlje je definisano kao proizvod pojačanja otvorene petlje AOL i povratnog faktora pojačavača β . [12]

Ono što je uticalo na izbor komponente transimpedansnog pojačavača jeste: mala ulazna struja polarizacije, mali *offset* napona i veliko pojačanje u otvorenoj petlji. Na osnovu ovih stavki odabran je veoma kvalitetan operacioni pojačavač *Burr-Brown from Texas Instrumets* OPA129U u SMD kućištu. U tabeli 1 su predstavljene osnovne specifikacije OPA129U operacionog pojačavača

Tabela 3.1 – Prikaz osnovnih specifikacija za odabir transimpedansni pojačavača [13]

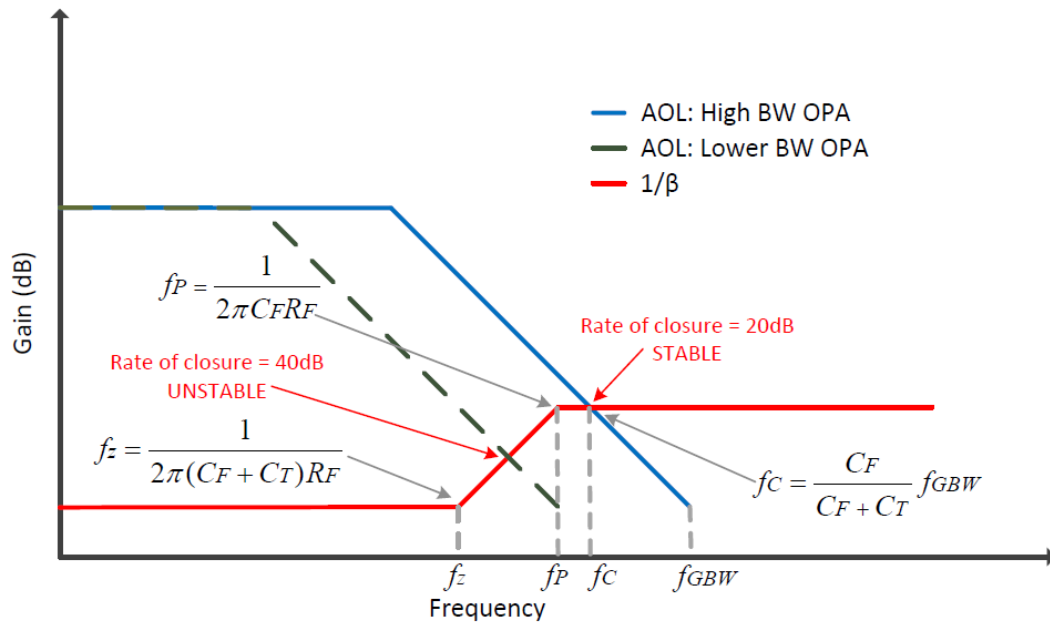
Parametar	Uslovi	Vrednosti
<i>Ulazna struja polarizacije</i>	$V_{CM} = 0 \text{ V}$	Max: $\pm 250 \text{ fA}$
<i>OFFSET napona</i>	$V_{CM} = 0 \text{ V}, V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	$\pm 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
<i>Šum – Napon</i>	$f = 10 \text{ Hz}$ $f = 100 \text{ Hz}$ $f = 1 \text{ kHz}$ $f = 10 \text{ kHz}$ $f_B = 0.1 \text{ Hz to } 10 \text{ Hz}$	$85 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $28 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $17 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $15 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $4 \mu\text{V}_{PP}$
<i>Ulazna impedansa Differential Common-Mode</i>	*	$10^{13} \parallel 1 \quad \Omega \parallel \text{pF}$ $10^{15} \parallel 2 \quad \Omega \parallel \text{pF}$
<i>Pojačanje otvorene petlje, DC</i>	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	120 dB

3.2.1 Stabilnost TIA operacionog pojačavača

Da bi pojačavač pravilno radio potrebno je da u toku rada bude stabilan. Način na koji se TIA projektuje da bude u stabilnom režimu rada jeste da treba da se ispoštuju neka pravila, a pre svega izgled izlazne amplitudske karakteristike pojačanja u odnosu na frekvenciju. To se radi tako što se na osnovu određenih frekvencija (nula i polova funkcije pojačanja) predstavljenih na slici 3.5 biraju vrednosti eksternih komponentata.

Na slici 3.5 predstavljen je *Bode*-ov grafik amplitudske karakteristike pojačanja tipičnog transimpedansnog pojačavača (otvorene petlje AOL i $1/\beta$ grafik tipičnog TIA).

Crvena kriva $1/\beta$ predstavlja nule f_Z i polove f_P funkcije frekventnog odziva. Iznad frekvencije f_Z kriva $1/\beta$ raste za $+20 \text{ dB/dec}$. Za frekvencije iznad f_P kriva $1/\beta$ je ravna i konstantna. AOL kriva preseca $1/\beta$ krivu na frekvenciji f_C .


 Slika 3.5 – Bode-ov grafik AOL i $1/\beta$ tipičnog TIA [12]

$$f_C = \frac{C_F}{C_F + C_T} f_{GBW} , \quad (2)$$

$$f_P = \frac{1}{2\pi C_F R_F} , \quad (3)$$

$$f_Z = \frac{1}{2\pi(C_F + C_T)R_F} . \quad (4)$$

U izrazu (2) f_{GBW} predstavlja frekvenciju na kojoj je pojačanje pojačavača jednako jedinici – jedinično pojačanje (eng. *Unity gain*).

Analizom pri kojim frekvencijama se seku krive (eng. *rate of closure*) AOL i $1/\beta$ može se utvrditi stabilnost operacionog pojačavača. Da bi sa sigurnošću tvrdili da je operacioni pojačavač u stabilnom stanju, onda rast od f_Z do f_P mora biti +20 dB/dec. AOL kriva mora preseći krivu $1/\beta$ kada ona postane ravna da bi se održala stabilnost, a ukoliko se dogodi da AOL seče krivu $1/\beta$ dok ona raste onda dolazi do moguće nestabilnosti pojačavača [12]:

$$f_C > f_P . \quad (5)$$

Izraz (5) nam daje sigurnost da izbegnemo nestabilnost pojačavača.

Sledeći izraz nam određuje minimalni potrebni *bandwidth* pojačavača da bi se mogla garantovati stabilnost TIA operacionog pojačavača.

$$f_{GBW} > \frac{C_T + C_F}{2\pi R_F C_F^2} \cdot \quad (6)$$

Ovim je rešen problem stabilnosti, ali još uvek nije rešen problem nastajanja termičkog šuma na otporniku R_F , njegovo superponiranje na korisini signal i pojačanje samog šuma.

Termički šum nastaje usled termičke fluktacije nosioca naelektrisanja u provodniku. Ovaj šum je prisutan u svim pasivnim elementima. Takođe, termički šum je nije zavisao od jačine struje. Ovakav šum se može modelovati kao napon ili kao struja. Kada ga modelujemo kao napon, onda ga postavljamo kao naponski generator redno sa bešumnim otpornikom. Ono što najviše povećava taj termički šum jeste velika vrednost otpornika u povratnoj sprezi i radna frekvencija.

Srednja kvadratna vrednost šuma e_n na provodniku otpornosti R koji se nalazi na temperaturi T u sistemu propusnog opsega Δf može se definisati kao:

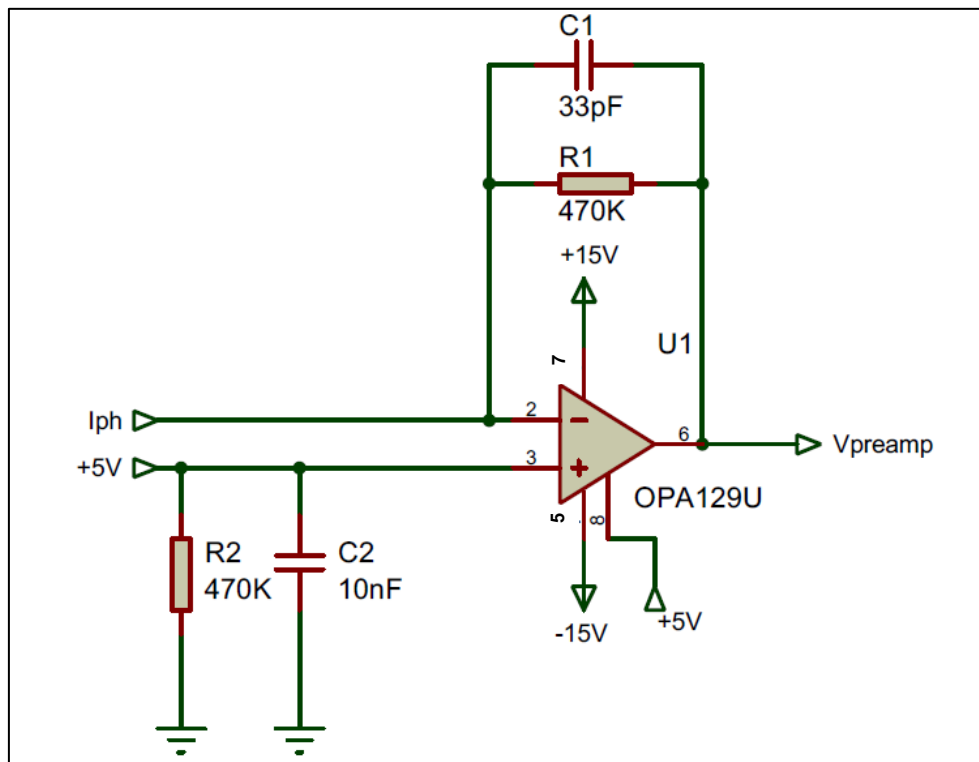
$$e_n = \sqrt{4k_B T R \Delta f} \cdot \quad (7)$$

Tako, za otpornik otpornosti 10 k Ω , na sobnoj temperaturi, u propusnom opsegu od 10 kHz, ova vrednost, prema (7), iznosi oko 1,3 μ V. [14]

Detaljna analiza šuma nije rađena, ali da bi se tvrdilo da je on sa sigurnošću manji, korišćen je otpornik manje vrednosti otpornosti od 470 k Ω .

3.2.2 Električna šema predpojačavača

Na osnovu iznetih rešenja problema u vezi sa stabilizacijom operacionog pojačavača i u vezi unutrašnjeg šuma (termički šum) u sistemu, radi se izbor komponentata. Kao što je već pomenuto, odabran je operacioni pojačavač *Burr-Brown from Texas Instrumets* OPA129U u SMD kućištu. Vrednosti pasivnih komponenti su birane na osnovu formula stabilnosti.



Slika 3.6 – Električna šema predpojačavača

Na slici 3.6 data je električna šema predpojačavača kada na njega nije povezan strujni izvor. Na osnovu prethodno predstavljenih izraza (1), (6), izračunate su vrednosti pasivnih komponentata. Iz tehniče dokumentacije je uzet maksimalni frekventni opseg operacionog pojačavača OPA129U, a zatim za poznatu vrednost struje, pomoću izraza (1) sračunavamo vrednost otpora R_1 u negativnoj povratnoj sprezi pojačavača. Pa tako, ako uzmemo da je vrednost ulazne struje $I_{PH} = 1 \text{ nA}$, a vrednost otpora $500 \text{ k}\Omega$, dobićemo da je napon $V_{preamp} = -0.5 \text{ mV}$. Vrednost otpornika od $500 \text{ k}\Omega$ se teško može naći, pa je u račun uzeta približna vrednost otpornika koja je dostupna. Umesto $500 \text{ k}\Omega$ uzeta je vrednost otpornika $470 \text{ k}\Omega$, a za ovaj otpor pri istoj ulaznoj struji izlazni napon predpojačavača je 0.47 mV .

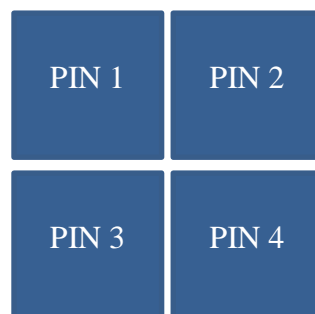
Kako bi odabrali vrednost kapacitivnosti C_1 moramo paziti na stabilnost operacionog pojačavača. Da bi se očuvala stabilnost rada operacionog pojačavača moraju se ispoštovati koraci opisani u odeljku stabilnost operacionog pojačavača.

Za već poznatu vrednost parazitne kapacitivnosti C_T i odabranu vrednost kapacitivnosti $C_1 = 33$ pF, a takođe i poznatu frekvenciju $f_{GBW} = 1$ MHz, prema (2), (6) izračunate su ključne tačke na *Bode*-ovom grafiku sa slike 3.5 i pritom ispoštovana je stabilnost rada operacionog pojačavača. Kapacitivnost C_1 je birana tako da su ispoštovane stavke stabilnosti rada operacionog pojačavača, a pod uslovom da je otpornost $R_1 = 470$ k Ω .

Na osnovu pomenutih formula izračunate su frekvencije:

$f_C = 392857.14$ Hz, $f_P = 10261.44$ Hz, $f_Z = 4031.28$ Hz, $f_{GBW} = 1$ MHz $>$ 26120 Hz, gde je $C_1 = 33$ pF, $R_1 = 470$ k Ω , $C_{DIFF} + C_{CM} = 3$ pF.

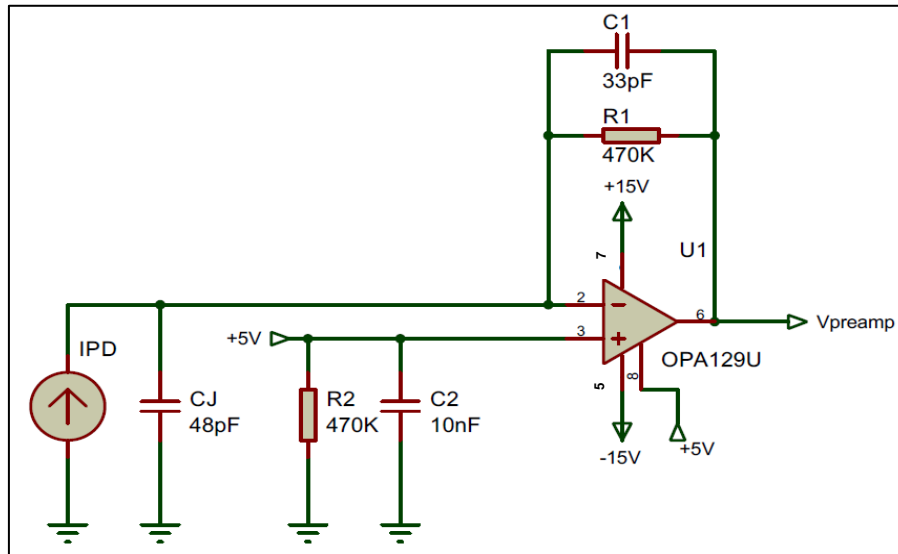
Treba napomenuti da je elektronski sklop projektovan za merenje električne struje generisane od strane inverzno polarisane PIN fotodiode koja je u datom trenutku izložena snopu jonizujućeg zraka. Deo koji se izlaže zračenju su četiri inverzno polarisane, paralelno vezane PIN fotodiode. Diode bi trebalo biti raspoređene u vidu kvadrata kao što je ilustrovano na slici 3.7 da bi se pokrila što veća površina kojom će se detektovati upadno zračenje.



Slika 3.7 - Ilustracija fizičkog postavljanja PIN fotodiode

U okviru proračuna uključena je kapacitivnost spoja C_J pri inverznoj polarizaciji PIN fotodiode BPW34[15]. Vrednost C_J je očitana sa grafika iz tehničke dokumentacije za vrednosti napona inverzne polarizacije 10 V i iznosi 12 pF. Pošto su diode vezane paralelno ukupna parazitna kapacitivnost iznosi 48 pF. Unutrašnja otpornost fotodiode nije uzeta u obzir. Za potrebe prethodnog računa ukupna kapacitivnost je $C_T = C_{DIFF} + C_{CM} + C_J = 51$ pF.

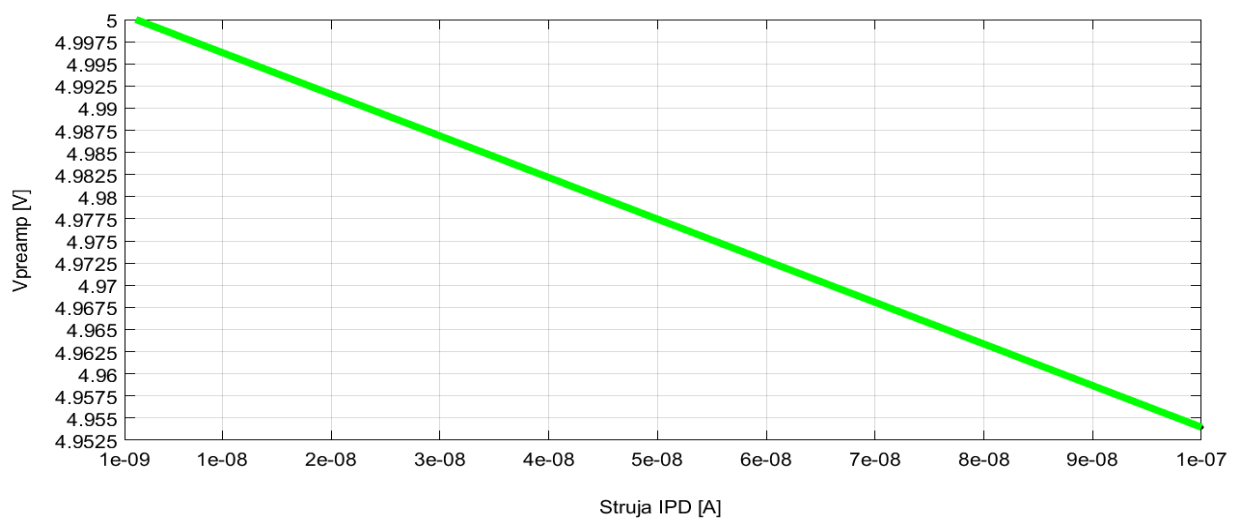
Na slici 3.8 prikazana je električna šema predpojačavača gde je na ulaz doveden strujni generator I_{PD} i njemu paralelno vezan kondenzator C_J . Ovakva konfiguracija sa kondenzatorom i strujnim generatorom predstavlja uprošćen model fotodiode kao izvor struje.



Slika 3.8 - Električna šema predpojačavača sa strujnim izvorom

Urađena je *DC sweep* analiza za opseg struje 1 nA do 1 μ A, sa korakom 10 nA.

Na slici 3.9 prikazana je zavisnost izlaznog napona od ulazne struje. Može se primetiti da se pojačan napon superponira na napon na neinvertujućem ulazu operacionog pojačavača (na napon od 5 V). Samim tim na izlazu operacionog pojačavača imamo vrednost napona na neinvertujućem ulazu umanjenu za vrednost pojačanog napona po formuli (1). Bitno je napomenuti da se napon V_{preamp} dovodi na inverujući ulaz instrumentacionog pojačavača gde se od njega oduzima vrednost 5 V i dodatno pojačava. Ovim se održava imunost na šumove korisnog signala.



Slika 3.9 – Zavisnost izlaznog napona V_{preamp} od struje I_{PH}

3.3 Instrumentacioni pojačavač

Kao što je već prikazano na blok dijagramu, ulazni singala se pojačava pomoću dva redno vezana pojačavača – predpojačavača i instrumentacionog pojačavača.

Teorijski, može se koristiti i samo prvi stepen, ali bi otpornik u povratnoj sprezi mora biti veoma veliki, reda veličine $G\Omega$. Velika otpornost bi prouzrokovala veliko pojačanje, ali samim tim bi se znatno povećao uticaj termičkog šuma, koji nije poželjan i degradira koristan signal. Praktično je mnogo bolje koristiti dva pojačavačka stepena.

Razlog zašto je odabran instrumentacioni operacioni pojačavač, a ne diferencijalni jeste taj što instrumentacioni ima mnogo bolji koeficijent potiskivanja ($CMRR^6$), kao i veću imunost na šumove zahvaljujući izolaciji u vidu bafera. Na osnovu svega, odabrani instrumentacioni pojačavač jeste *Burr-Brown from Texas Instrumets* INA121 [17].

U tabeli su predstavljen najbitnije karakteristike odabranog instrumentacionog pojačavača, prema tehničkoj dokumentaciji.

Tabela 3.2 – Osnovni parametri instrumentacionog pojačavača INA121U [17]

Parametar	Uslovi	Vrednosti
INPUT: Offset Voltage, RTI: Impedansa, Diferencijalno: Common-Mode: Common-Mode Rejection:	* $V_O = 0\text{ V}$ $V_{CM} = -12.5\text{V to } 13.5\text{V}$ $G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 1000$	$\pm 200 \pm 200/G \mu\text{V}$ $10^{12} \parallel 1 \Omega \parallel \text{pF}$ $10^{12} \parallel 12 \Omega \parallel \text{pF}$ 86 100 106 106
Šum - Napon: $f = 10\text{Hz}$ $f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f_B = 0.1\text{Hz to } 10\text{Hz}$ Struja: $f = 1\text{kHz}$	$R_S = 0$ $G = 100$ $G = 100$ $G = 100$ $G = 100$	$30 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $21 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $1 \mu\text{V}_{PP}$ $1 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Izraz za pojačanje Opseg pojačanja	$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$ 1 to 10000	V/V

⁶ Ako se signal podjednako primeni na oba ulaza operacionog pojačavača, onda ga podrazumevamo kao zajednički signal (eng. *common signal*). Koeficijent potiskivanja $CMRR$ (eng. **C**ommon-**M**ode **R**ejection **R**atio) je odnos pojačanja u uobičajenom režimu i pojačanja diferencijalnog režima. Pojačavač je bolji ukoliko mu je $CMRR$ koeficijent što veći. $CMRR$ se izražava u dB.[16]

Na invertujući ulaz instrumentacionog pojačavača se dovodi signal V_{preamp} , a na neinvertujući signal se dovodi stabilnan napon 5 V. Konvertovani signal struje u napon je pojačan i pritom superponiran na napon od 5 V u predpojačavačkom bloku. Takav signal se dovodi na inverujući ulaz instrumentacionog pojačavača. Na ulazu instrumentacionog pojačavača dolazi do algebarskog zbira napona, odnosno oduzimanja $V^+_{INS} - V^-_{INS}$.

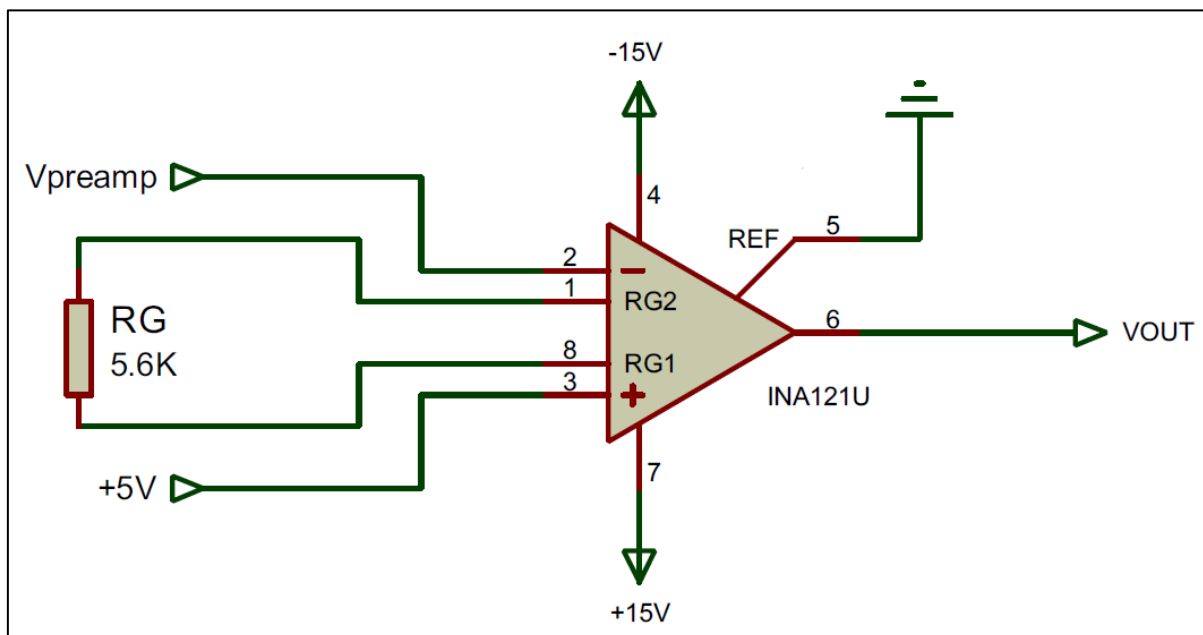
Prema sledećim izrazima se dokazuje prethodna tvrdnja:

$$V_{PREAMP} = 5V + (-R_1 I_{PD}), \quad (8)$$

$$V_{OUT} = V^+_{INS} - V^-_{INS}, \quad (9)$$

$$V_{OUT} = 5V - V_{PREAMP}. \quad (10)$$

Naponi V^+_{INS} i V^-_{INS} predstavljaju napone na neinvertujućem i invertujućem ulazu instrumentacionog pojačavača, a napon V_{OUT} predstavlja izlazni napon. Takođe, V_{OUT} predstavlja i izlazni napon elektronskog sklopa. Električna šema instrumentacionog pojačavača prikazana je na slici 3.10.



Slika 3.10 - Električna šema bloka sa instrumentacionim pojačavačem

Naponsko pojačanje instrumentacionog pojačavača se određuje eksternim otpornikom R_G . Vrednost otpornika R_G se može izračunati na osnovu zahtevanog pojačanja,

ali proizvođač radi lakšeg snalaženja nudi tabelu sa predloženim vrednostima otpornika R_G za zahtevano pojačanje G .

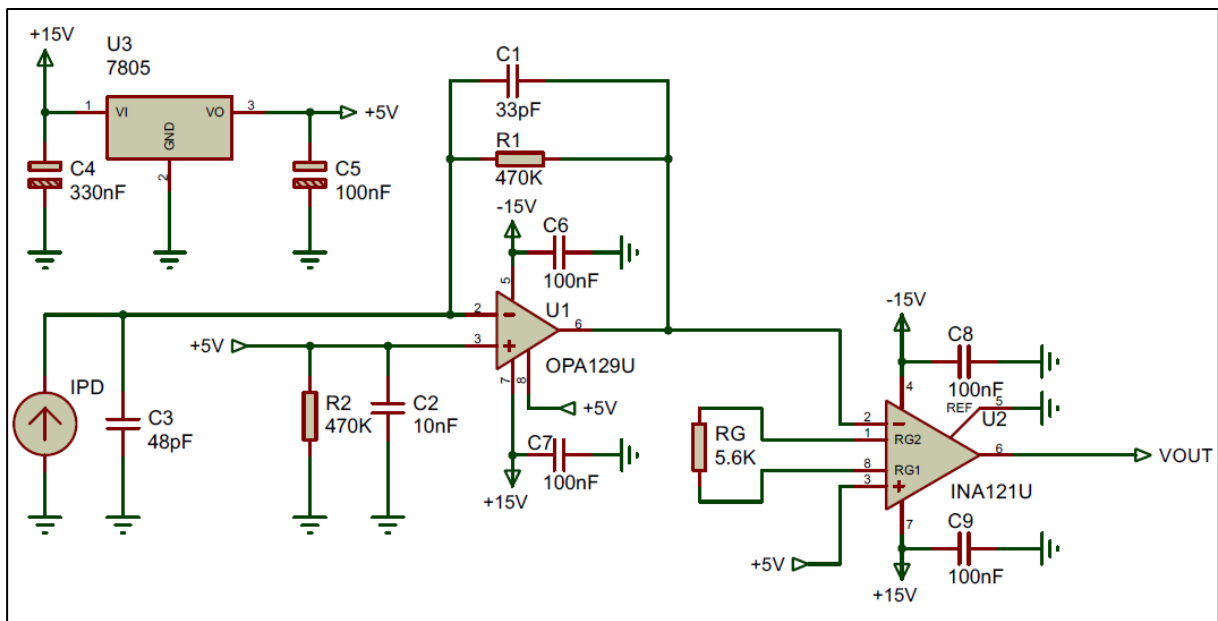
Tabela iz tehničke dokumentacije instrumentacionog pojačavača data je ispod.

Tabela 3.3 - Često korišćeni otpornici i veličine [17]

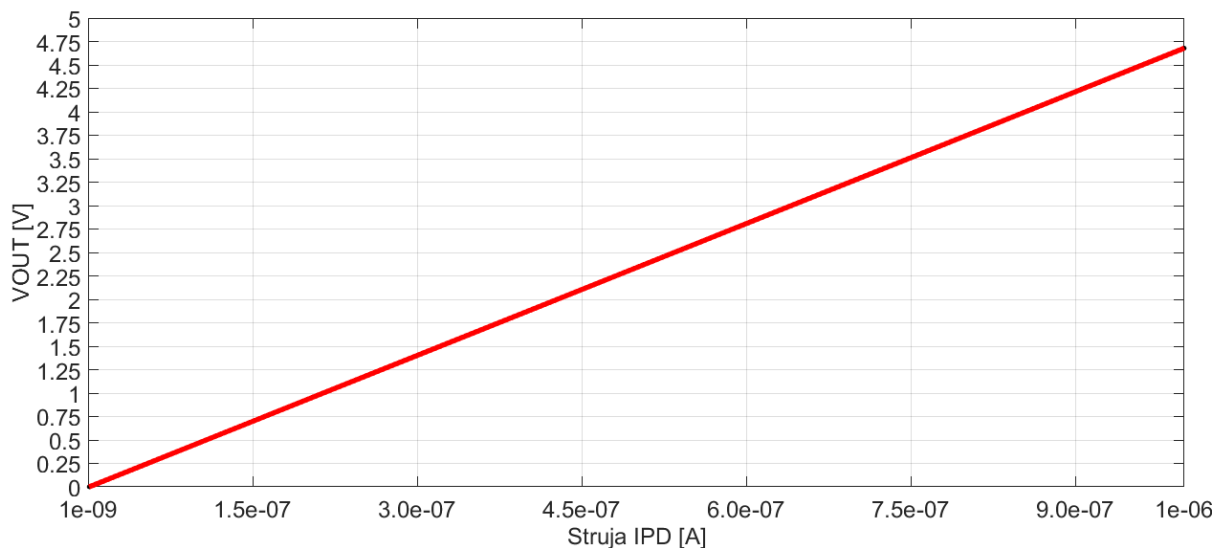
G [V/V]	R_G [Ω]
1	NC
2	49.9k
5	12.4k
10	5.62k
20	2.61k
50	1.01k
100	511
200	249
500	100
1000	49.9
2000	24.9
5000	10
10000	4.99

3.4 Električna šema

U ovoj subsekciji je predstavljena celovita električna šema elektronskog sklopa, a na osnovu električne šeme data je i grafik simulacije zavisnost izlaznog napona V_{OUT} od ulazne električne struje I_{PD} . Električna šema i simulacija su odrađene uz pomoću Proteus 8 softverskog alata.



Slika 3.11 - Električna šema



Slika 3.12 - Grafik zavisnosti napona V_{OUT} od struje I_{PD}

GLAVA 4

4 PROJEKTOVANJE ŠTAMPANE PLOČE

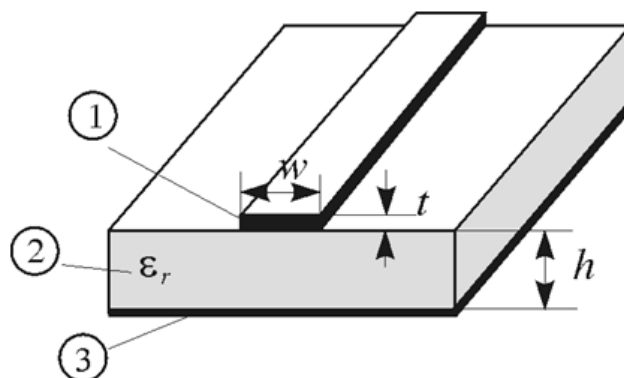
Posle uspešno urađene simulacije sledelo je projektovanje štampane ploče.

Na prvi pogled je veoma jednostavno, ali pošto se radi o veoma osetljivim signalima na šumove, mora da se obratiti posebna pažnja na sam dizajn planarnih transmisionih linija i raspored komponenti na ploči.

4.1 Planarne transmisione linije

Planarne transmisione linije jesu jedna od osnovnih komponenti štampanih ploča, pomoću kojih se povezuju sve komponente na ploči, izrađuju antene, projektuje prilagođenje impedanse i dr.

Planarne transmisione linije jesu metalne bakarne trake koje se nalaze na dielektričnoj podlozi (supstratu). Najčešće korišćeni tip planarnih transmisionih linija je mikrostrip linija (eng. *microstrip*). Na slici 4.1 data je ilustracija mikrostrip linije.



Slika 4.1 – Ilustracija mikrostrip linije [18]

Mikrostrip linija se sastoji od provodnika – provodne trake (1), debljine t i širine w , koja se nalazi na dielektričnoj podlozi (supstratu) debljine h , relativne dielektrične konstante ϵ_r (2), a sa donje strane supstrata nalazi se uzemljena metalna traka (3) koja je razlivena na celokupnoj donjoj površini supstrata. [18]

Pri izradi štampane ploče treba obratiti pažnju na izbor podloge, širinu i debljinu mikrostripa. Treba naglasiti da je dizajner u mogućnosti da izabere tip i debljinu h podloge, da u softverskom alatu za projektovanje štampanih ploča može menjati širinu w mikrostripa, dok

debljina t mikrostripa zavisi od proizvođača štampanih ploča. Prilikom izrade štampanih ploča (u daljem tekstu dvoslojne štampane ploče) na podlogu se nanosi bakar određene debljine izražene u uncama⁷. Zapravo debljina nanetog bakra se definiše brojem unci na površini od jedne kvadrata stope⁸.

Širina mikrostripa w je veoma bitna, jer od nje zavisi smaksimalna struja koja tu može da protekne, a da je ne ošteti. Pregled širina mikrostrip linija u zavisnosti od struje koja protiče kroz nju data je u tabeli. [19]

Tabela 4.1 – Pregled minimalnih širina linija w za datu struju I [19]

I [A]	w [mm]
1	0.250
2	0.76
3	1.27
4	2.03

Najčešće se u literaturi za širinu mikrostrip linije koriste jedinice mils koje su hiljaditi deo inča. U radu će se u nastavku koristiti milsi za širinu mikrostripa w , a za debljinu bakra unce.

U našem slučaju, a prema mogućnosti proizvođača štampanih ploča, debljina mikrostripa kojom su povezane ostale komponente je 10 *mils*-a, dok je debljina linija za napajanje komponenti 20 *mils*-a zbog napona napajanja od ± 15 V. Takođe, debljina bakra je 1 oz, a odabrani supstrat je FR-4 (fiberglas očvrstnut epoksidnom smolom) debljine 1.6 mm.

Da bi se mikro strip posmatrao kao transmisiona linija oko njega i na donjoj strani podloge mora postojati razlivena masa ka kojoj će se ulivati linije električnog i magnetnog polja. Ovim se sprečava neželjni efekat sprege između dve različite mikrostrip linije kroz koje protiču dva različita signala. Takođe ovim se poboljšava otpornost na spoljne šumove.

Uz pomoć *on-line* kalkulatora [20], podešavanjem širine w i rastojanje između okolne razlivena mase može se izračunati karakteristična imedansa Z_0 transmisionje linije.

⁷ Unca (eng. *Ounce*) je jedinica za masu, težinu ili zapreminu najčešće korišćena u Velikoj Britaniji. Uglavnom se koristi za izražavanje mase plemenitih metala (1 oz = 28.3495 g, 1 oz = 35 μ m).

⁸ Kvadratna stopa (eng. *Square foot*) jeste mera za površinu izvan SI sistema i najčešće korišćena u Sjedinjenim Američkim Državama i Velikoj Britaniji (1 ft² = 929.03 cm²).

4.2 Prilagođenje impedanse

Karakteristična impedansa jeste ona impedansa koja određuje protok viskofrekventnog signala kroz prenosni vod, odnosno mikrostrip. Ona predstavlja odnos intenziteta električnog i magnetnog polja u vodu koja nastaju kao posledica prostiranja električnog signala kroz sam prenosni vod. Karakteristična impedansa je konstanta za dati prenosni vod, a to znači da ona ima istu vrednost na ulazu provodnika kao i na izlazu bez obzira na njegovu dužinu. Zavisí od konstrukcije i materijala od kojeg je vod napravljen, odnosno njegovih električnih parametara.

U radu su korišćeni BNC konektori. Na njih se montira koaksijalni kabl karakteristične impedanse 50Ω , koji treba da obezbedi neometan i od šuma zaštićen prenos signala od strujnog izvora do elektronskog sklopa i od elektronskog sklopa do uređaja za merenje napona. Da bi se obezbedio maksimalni prenos snage impedansa mikrostripa mora biti jednaka karakterističnoj impedansi koaksijalnog kabla.

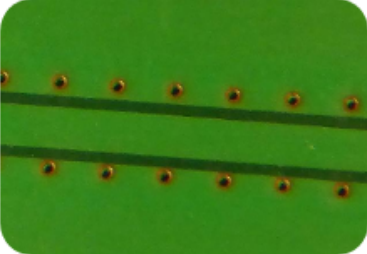
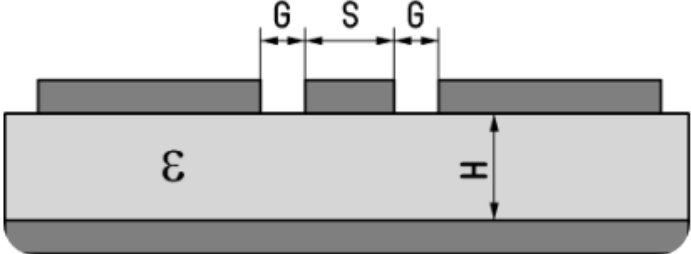
Na pin („vrući“ pin) BNC konektora na kome će se prostirati signal mora da se poveže vod (transmisiona linija – mikrostrip) jednake karakteristične impedanse kao i impedansa koaksijalnog kabla. Takav vod se naziva *single co-planar microstrip*, a pomoću on-line programa može se utvrditi karakteristična impedansa zadavanjem njene vrednosti, a ono što se dobija kao promenljiva jeste širina *microstrip*-a[20]. Poznate vrednosti jesu: materijal od koga je izrađena ploča (FR-4), dielektrična konstanta materijala $\epsilon_r = 4.3$, debljina materijala je 1.6 mm i debljina razlivenog bakra 1 oz.

Izjednačavanje impedanse na ulazu i izlazu elektronskog kola sa impedansom koaksijalnog kabla, sprečava se preslušavanje (eng. ringing) u tranzijentnom odzivu kod širokopojasnih sistema i obezbeđuje se prilagođenje impedanse zbog maksimalnog prenosa signala.

Na slici 4.2 predstavljen je izgled *on-line* internet kalkulatora za izračunavanje karakteristične impedanse Z_0 koplanarnog voda oko i ispod kog se nalazi razliveni bakar povezan sa masom (eng. *grounded Co-planar waveguide*).

Coplanar Waveguide Impedance Calculator

(Bottom layer as well as adjacent copper is ground)

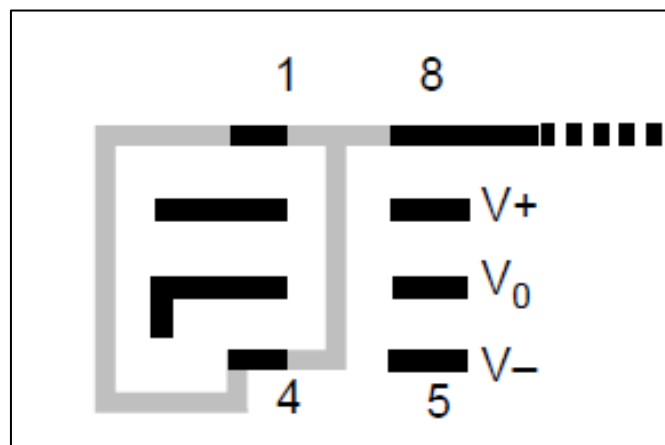
Substrate Thickness H [mm]	1.600	+ 5 %	- 5 %
Gap Width G [mm]	0.254	+ 5 %	- 5 %
Conductor Width S [mm]	1.535	+ 5 %	- 5 %
Relative Dielectric Constant ϵ_{rel}	4.300	+ 5 %	- 5 %
Impedance [Ω]	50.027		
Effective Dielectric Constant ϵ_{eff}	2.757		

Slika 4.2 – Izgled *online* kalkulatora karakteristične impedanse na osnovu parametara koplanarnog voda [20]

4.3 Projektovanje *layout*-a štampane ploče

Prilikom dizajna štampane ploče mora se obratiti posebna pažnja na samo projektovanje mikrostrip linija na ploči i odabir komponenata. Dodatno se mora obratiti pažnja na raspored komponenata na ploči zbog kojih se javlja dodatna parazitna kapacitivnost na invertujućem ulazu pojačavača koje mogu kolo učiniti nestabilnim. Da bi se izbegao ovaj neželjeni efekat, na površini oko invertujućeg ulaza na oba sloja (eng. *bottom and top layer*) se uklanja razlivena masa (eng. *ground polygon pour*) na štampanoj ploči.

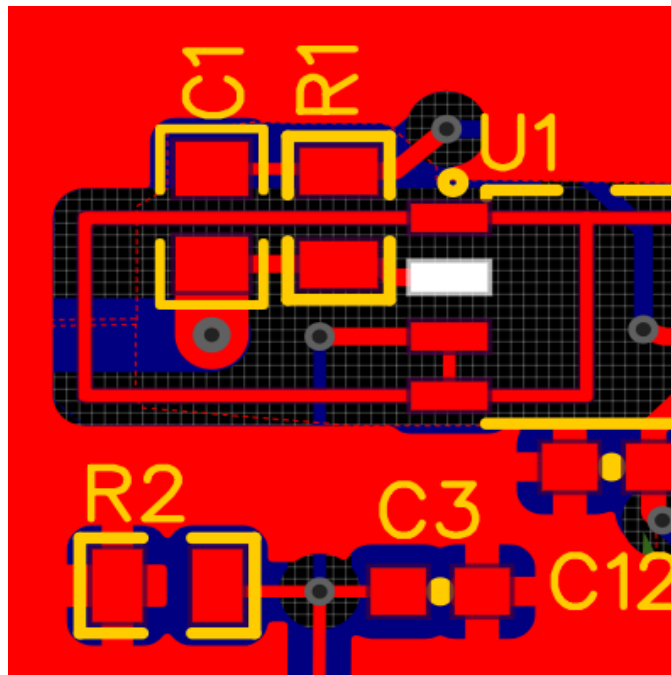
Oko ulaznih pinova postavljen je zaštitni prsten koji nije zaštićen solder maskom. Zaštitni prsten (eng. *Guard ring*) predstavlja *PCB* implementaciju zaštitnog provodnika. Standardno se primenjuje kod konfiguracija sa operacionim pojačavačima. S obzirom da potencijali ulaznih pinova operacionog pojačavača teže da se izjednače, ideja je da se ulazni pin na koji se dovodi signal okruži prstenom koji je na potencijalu drugog pina. Na taj način se sprečava uticaj struja curenja, koje potiču od okolnih linija veze na štampanoj ploči, na rad i stabilnost operacionog pojačavača. [19] Praktično je najbolje da potencijal na koji se vezuje zaštitni prsten bude veći od referentnog potencijala, odnosno uzemljenja. Prema preporuci proizvođača vezano za *layout* dizajna odrađeno je povezivanje i implementacija za operacioni pojačavač OPA129U kao na slici 4.3.



Slika 4.3 – Primer implementacije zaštitnog prstena iz tehničke dokumentacije OPA129U [13]

Crne linije na slici 4.3 predstavljaju otisak SMD komponente OPA129U, dok siva linija predstavlja ilustraciju implementacije zaštitnog prstena oko ulaza operacionog pojačavača. [13]

Na slici 4.4 prikazan je deo projektovanog prototipa *layout*-a štampane ploče oko ulaza transimpedansnog operacionog pojačavača.

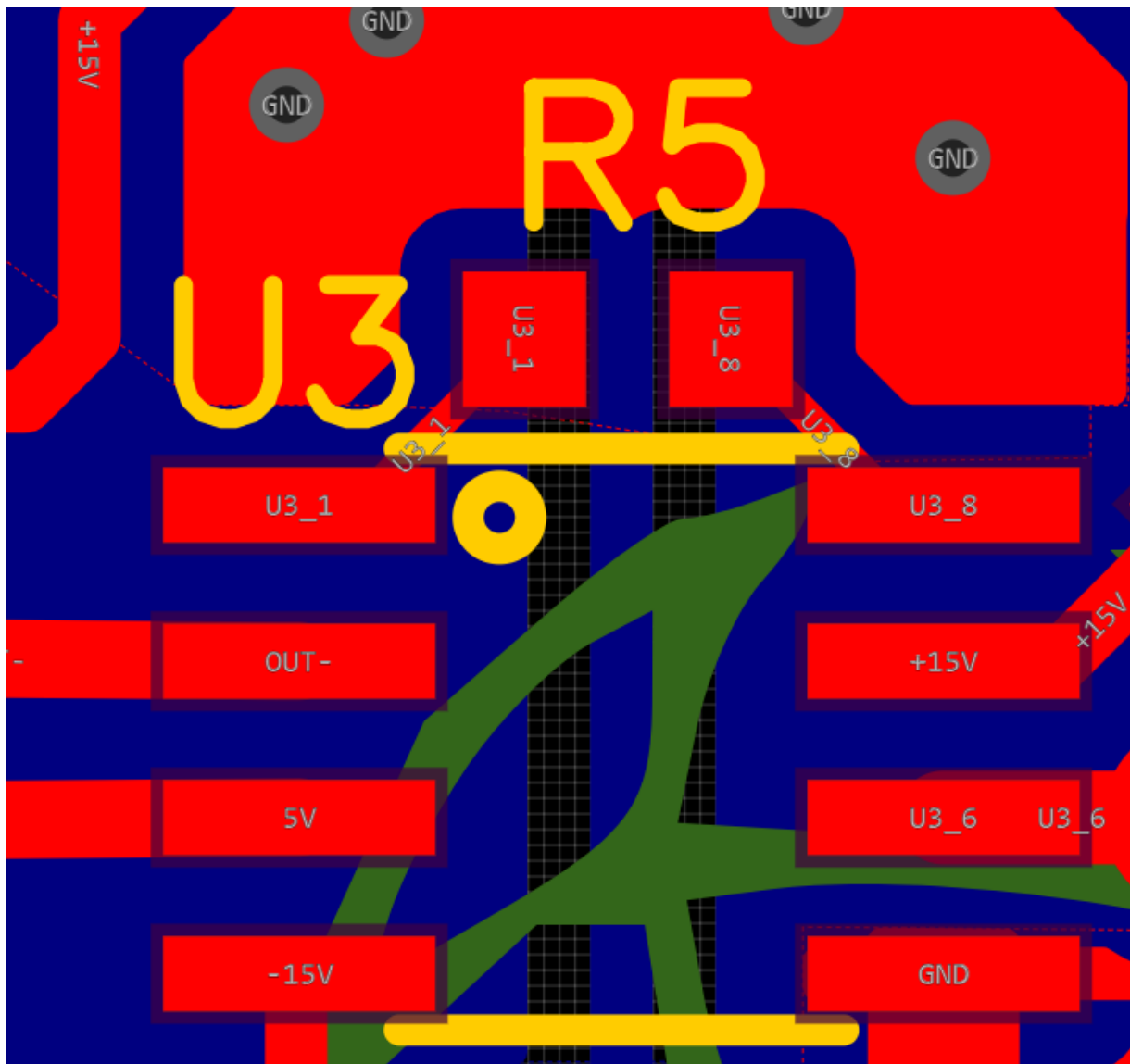


Slika 4.4 – Implementacija zaštitnog prstena oko invertujućeg i neinvertujućeg pina operacionog pojačavača i raspored okolnih SMD komponenti

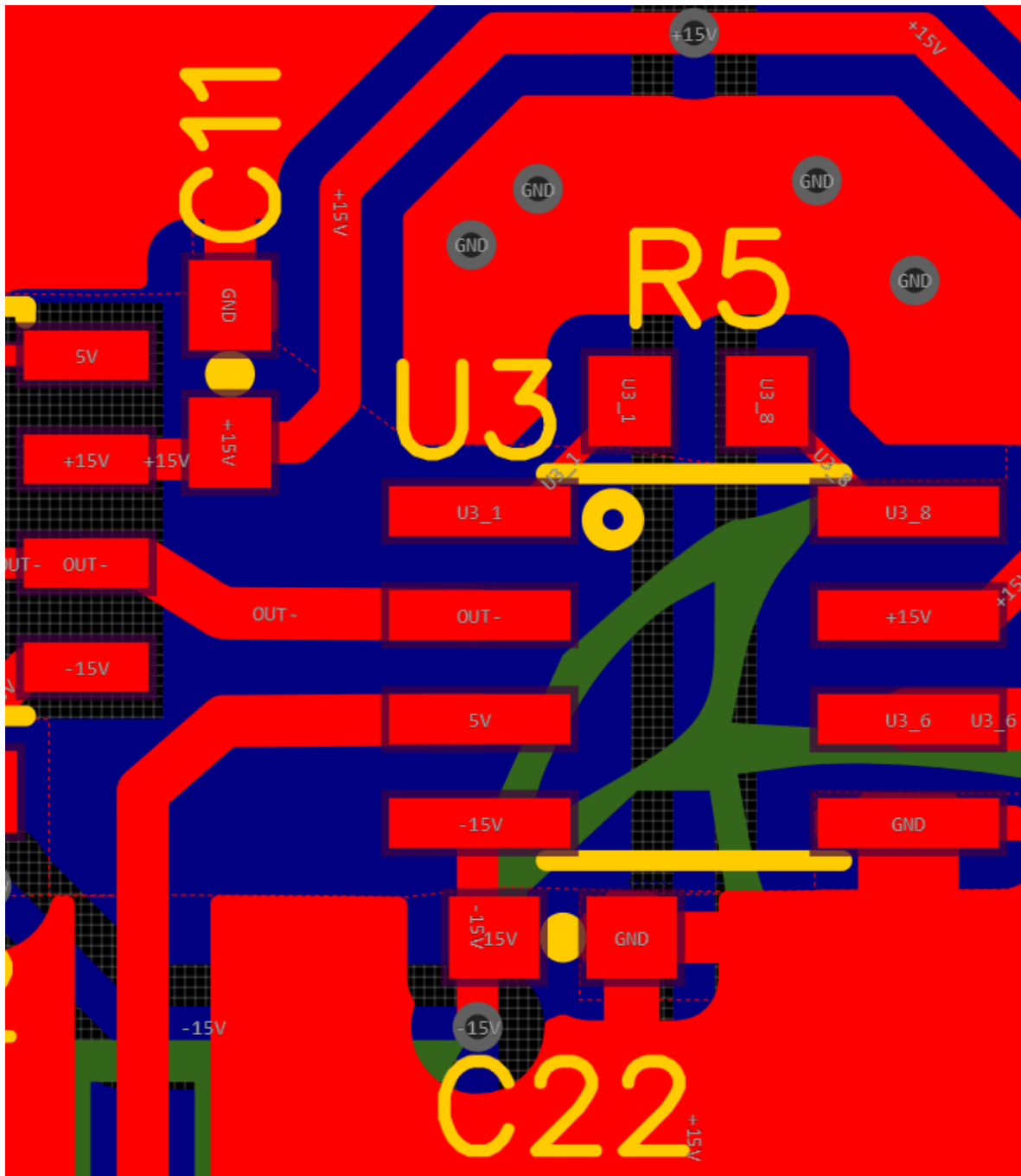
Kao što je prethodno bilo reči, sa unutrašnje strane zaštitnog prstena nema razlivena masa sa gornje i donje strane ploče, dok sa spoljne strane postoji razlivena masa sa obe strane štampane ploče.

Treba obratiti pažnju na dizajn linija na ulazu instrumentacionog pojačavača INA121. Linije na ulazu instrumentacionog pojačavača trebaju biti dobro izbalansirane i što kraće. Treba smanjiti dužinu linija mikrostripa od otpornika za pojačanje R_5 do pinova instrumentacionog pojačavača. Ono što je podrazumevano kod svih SMD integrisanih kola to je da decoupling kondenzatori trebaju biti što bliže pinovima za napajanje.

Na slikama 4.5, 4.6 je prikazan sam način projektovanja *layout*-a i pozicioniranje eksternih komponenti i mikorstrip linija oko instrumentacionog pojačavača.



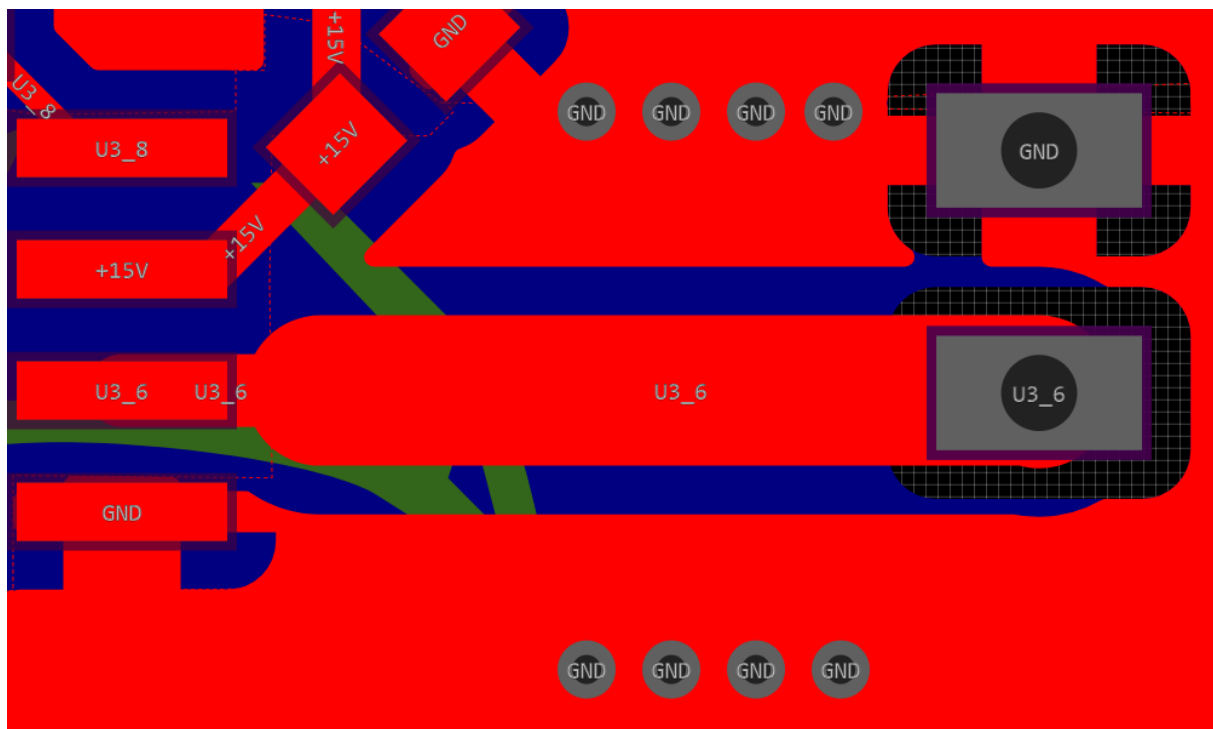
Slika 4.5 – Prikaz *layout*-a i pozicija otiska za SMD otpornik R5 u odnosu na pinove i otisak instrumentacionog pojačavača INA121



Slika 4.6 – Prikaz *layout* dizajna povezanosti izlaza OPA129U (levo) i linije 5V sa ulazom instrumentacionog pojačavača. Prikaz rasporeda otiska nekih od *decoupling* kondenzatora.

Na ulazu i izlazu elektronskog sklopa se nalaze otisci BNC konektora na koje se povezuje ulazni signal sa invertujućim ulazom OPA129U, a izlazni BNC je vezan za izlaz instrumentacionog pojačavača INA121. Na BNC konektore se priključuju koaksijalni kablovi, pomoću kojih se štiti prostiranje signala od neželjenih šumova.

Kao što je već objašnjeno, da bi se ispunio uslov prilagođenja impedanse voda koja povezuje ulaz i izlaz sa BNC konektorima i karakteristična impedansa koaksijalnog kabla moraju biti jednake. Pomoću online kalkulatora je izračunata debljina mikrostripa i određeno rastojanje sa obe strane mikrostripa od razlivenne mase. Na slici 4.7 prikazan je izgled voda na izlazu elektronskog sklopa. Vod povezuje izlaz instrumentacionog pojačavača sa odgovarajućim otiskom BNC konektora.



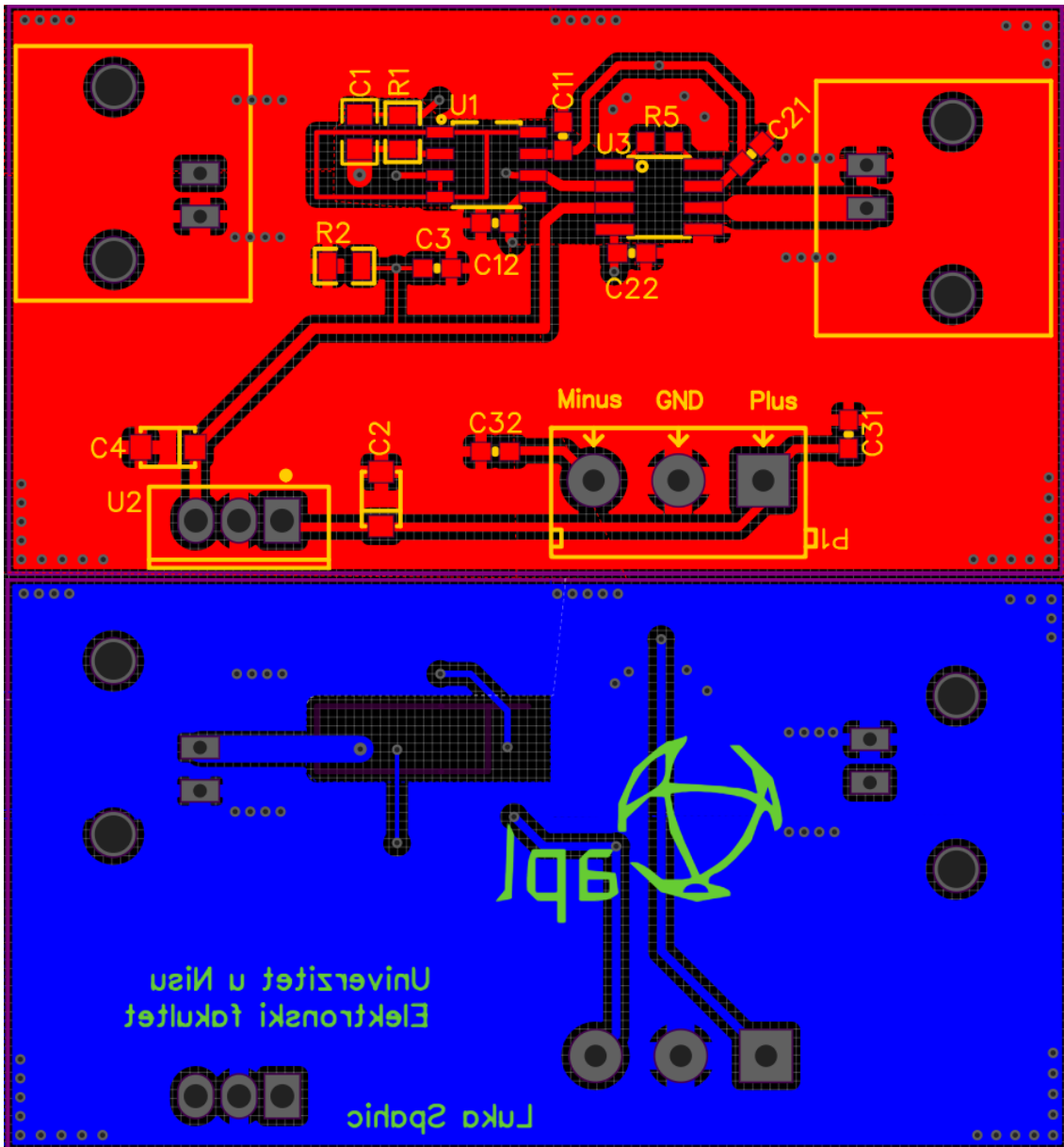
Slika 4.7 – Prikaz *layout*-a voda za prilagođenje na karakterističnu impedansu $Z_0 = 50 \Omega$

Na slici 4.7 se može primetiti da je mikrostrip za prilagođenje deblji od ostatka linija u *layout*-u. To je zbog toga da bi se obezbedila njegova zahtevana karakteristična impedansa. Mikrostrip treba da se maksimalno koliko to pravila dizajna i tehnološke mogućnosti dozvoljavaju, približi izlaznom pinu instrumentacionog pojačavača.

Tokom projektovanja korišćeni su SMD otpornici sa tolerancijom od 1 %. Ako je potrebna veća preciznost, mogu se koristiti otpornici sa manjom tolerancijom. Što se tiče

kondenzatora korišćeni su SMD keramički i tantalni elektrolitski kondenzatori. Upotreba SMD komponenata je urađena zbog toga da bi se uticaj mogućeg šuma koji može poteći od velikih komponenti smanjio.

Na slici 4.8 prikazan je *layout* štampane ploče sa pogledom odozgo i sa pogledom odozdo.



Slika 4.8 – Prikaz gornjeg (crveno) i donjeg sloja (plavo) dizajna štampane ploče projektovane u softverskom alatu *EasyEDA*

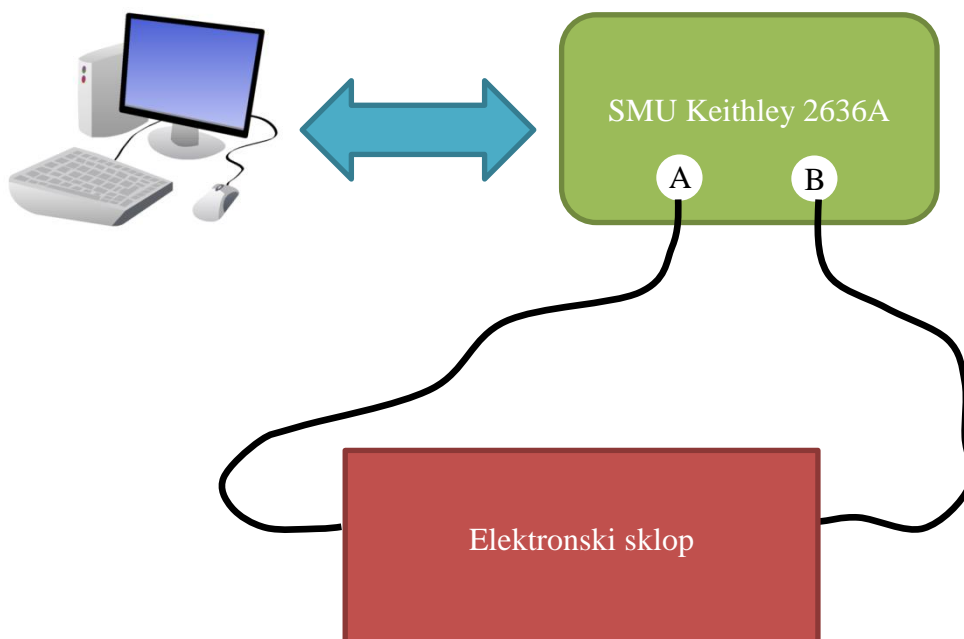
GLAVA 5

5 POSTAVKA MERENJA I REZULATI

Obrada rezultata merenja urađena je pomoću softverskog alata *Matlab*, a pokretanje samog merenja odrađeno je pomoću dvokanalnog *Source Measuring Unit - Keithley 2636A* i računara koji upravlja procesom merenja preko gotove *Windows* aplikacije napisane u *Visual Studio C#*-u.

5.1 Kratak opis načina povezivanja elektronskog sklopa sa mernom opremom i korišćenja *Windows* aplikacije

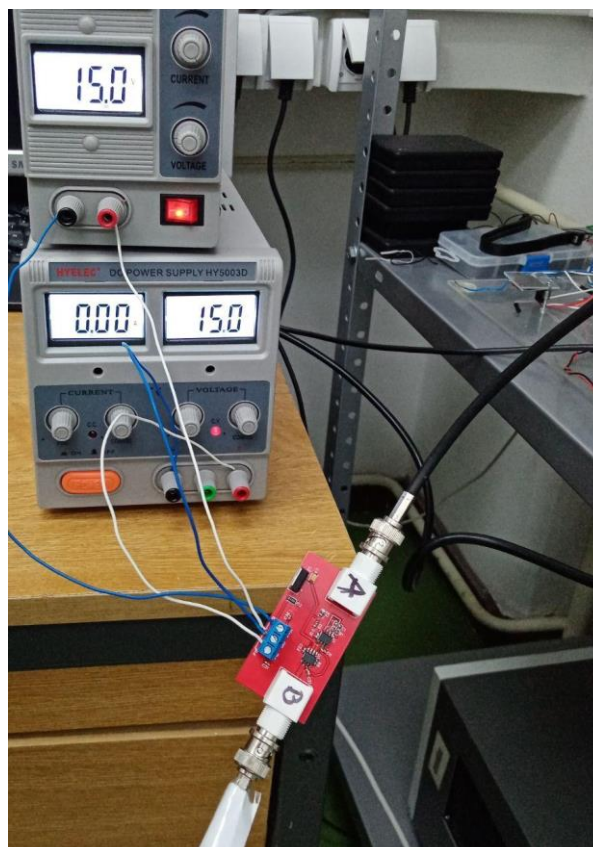
Korišćena aplikacija za automatsko pokretanje i izvršavanje procesa merenja koja je iskorišćena u ovom radu olakšava zadavanje vrednosti opsega ulazne struje i istovremeno merenje izlaznog napona na izlazu elektronskog sklopa. Sa računarom je povezan SMU *Keithley 2636A*, a SMU je koaksijalnim kablovima povezan sa elektronskim sklopom. Na slikama 5.1, 5.2 i 5.3 prikazano je povezivanje elektronskog sklopa.



Slika 5.1 – Način povezivanja elektronskog sklopa sa mernom opremom



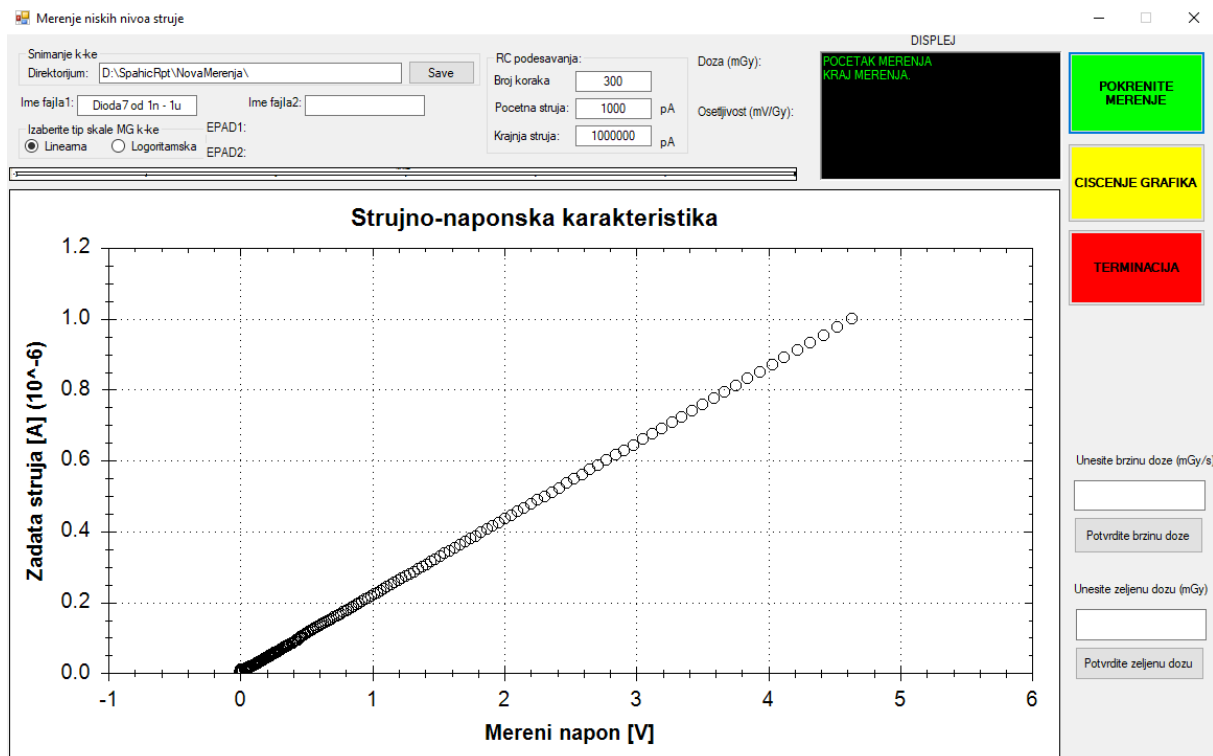
Slika 5.2 – Prikaz dela laboratorije APL gde se vršilo merenje



Slika 5.3 – Štampana ploča elektronskog sklopa povezana na merni instrument i napajanje

Postupak merenja se izvodi nakon što se kao na slici 5.1 elektronski sklop poveže na mereni instrument. Koaksijalni kabl „A“ predstavlja izvor generisane struje u zadanom opsegu. Povezuje se na ulaz elektronskog sklopa. Koaksijalni kabl „B“ se povezuje na izlaz elektronskog sklopa, sa koga se prikuplja napon. Napon na izlazu predstavlja pojačanu vrednost struje konvertovanu u izlazni napon.

U programskom okruženju korisnik može zadati broj tačaka merenja, opseg zadate struje izražene u pA i grafički prikaz zadate struje i merenog napona. Takođe postoji opcija čuvanja rezultata merenja u vidu tekstualnog fajla sa ekstenzijom .m koji se kasnije može iskoristiti za obradu podataka u softverskom alatu *MatLab*. Softver za automatsko merenje funkcioniše tako što za svaku tačku postavi vrednost struje na kanal A, a na kanalu B izvrši merenje napona. Takođe u gornjem desnom terminalu postoji indikator kada je merenje pokrenuto i kada je merenje završeno. U slučaju da dođe do iznenadne greške merenja ili havarije na sistemu za merenje postoji opcija za hitnu terminaciju merenja. Na ovaj način se štiti i korisnik i oprema za merenje. Na slici 5.4 prikazan je izgled softvera za automatsko merenje.



Slika 5.4 - Izgled softverskog alata za automatsko merenje

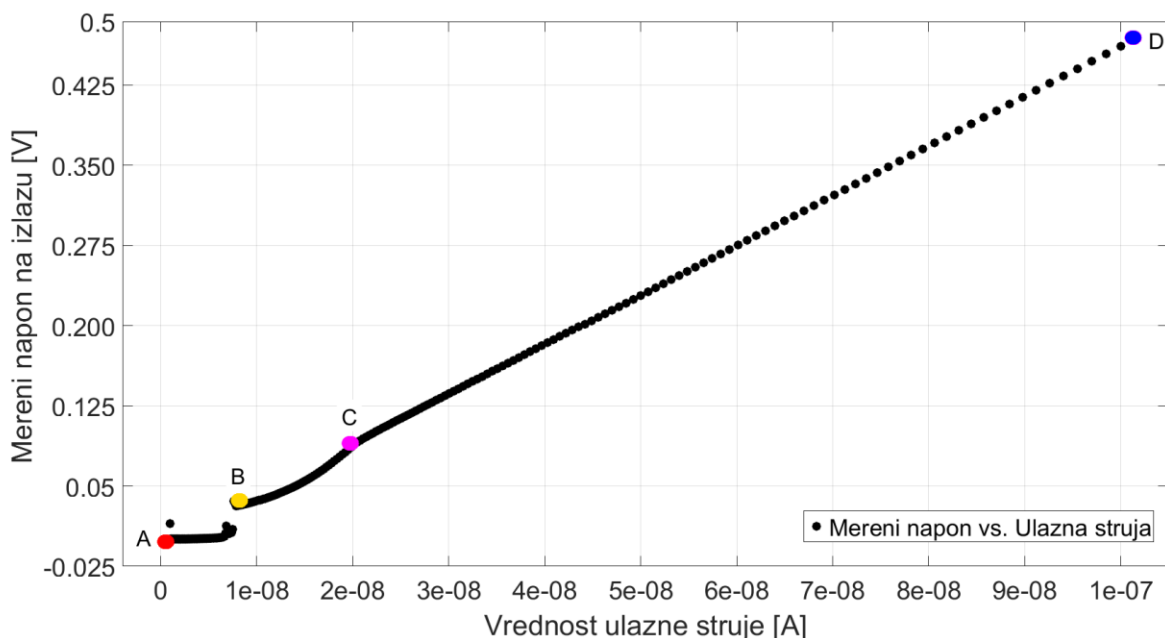
Bitno je napomenuti da neke opcije softverskog alata nisu korišćene. Softverski alat se koristio isključivo za kontrolu struje i merenje napona.

5.2 Rezultati merenja

U nastavku biće prikazani grafici zavisnosti napona od ulazne struje za različite opsege struje. Eksperiment je izveden u Laboratoriji za primenjenu fiziku na Elektronskom fakultetu u Nišu.

Pre početka merenja bilo je potrebno zalemiti odgovarajuće komponente na izrađenoj štampanoj ploči. Prilikom merenja komponenti osoba koja ih lemi mora biti uzemljena, a lemnjenje se mora obaviti na odgovarajućoj silikonskoj podlozi. Ovim se sprečava oštećenje osetljivih komponenta od strane eletro-statičkog pražnjenja koje može uzrokovati čovek ili neodgovarajuća podloga. kada se lemnjenje komponenta završi, sledi čišćenje pločice 70 % alkoholom od nečistoća nastale usled procesa lemnjenja. Čišćenjem se sprečava mogućnost izazivanja kratkog spoja među komponentama ili nepravilan rad samog elektronskog skopa.

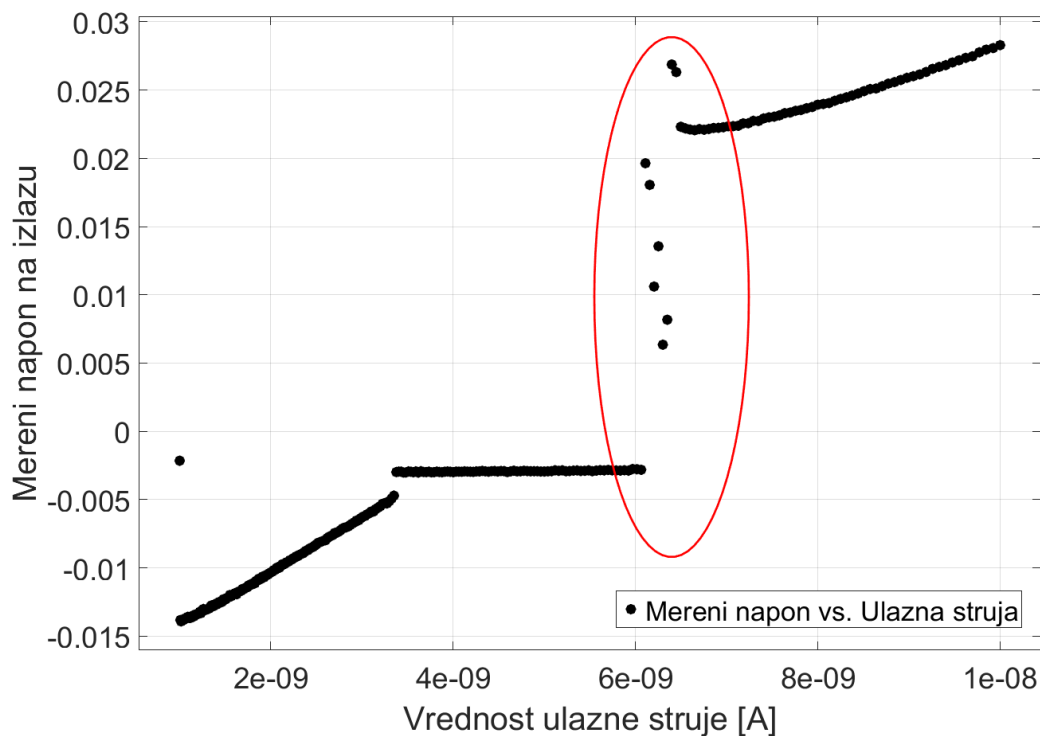
Na slici 5.5 predstavljen je grafik zavisnosti napona od struje. Opseg merenja struje je 1 nA – 100 nA sa 300 tačaka. Merenje je ponovljeno 10 puta. Treba napomenuti da prilikom ovog merenja elektronski sklop nije oklopljen i zaštićen od elektromagnetnih smetnji!



Slika 5.5 – Kriva odziva izlaznog napona na ulaznu struju

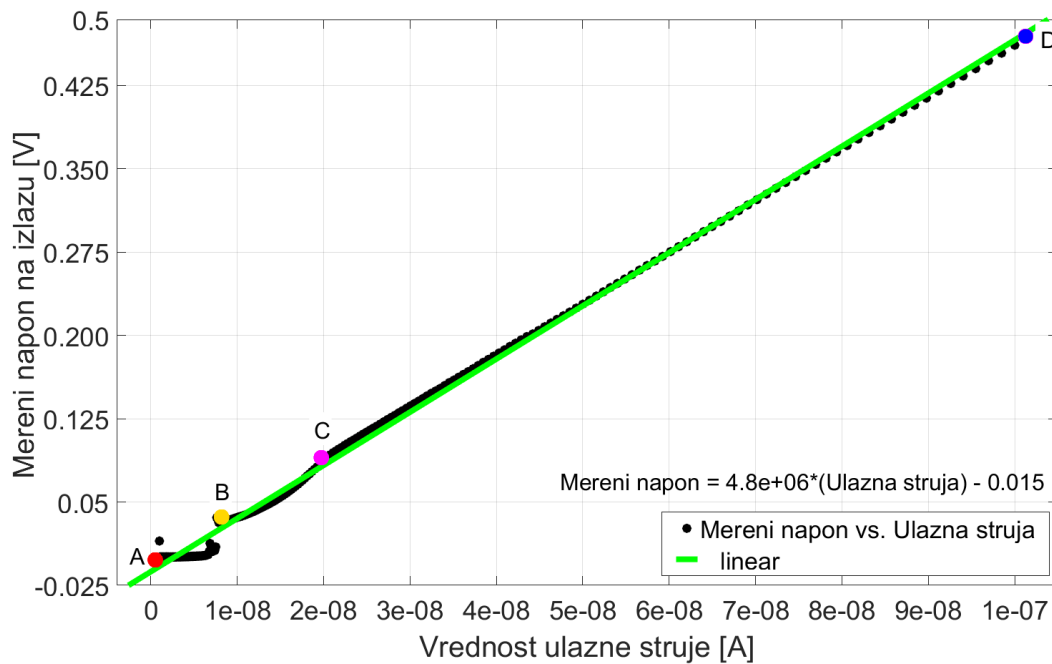
Kao što se može videti, izlazni napon za ulaznu struju opsega od tačke A do tačke B nije linearan i negativan je. Pretpostavlja se da je razlog ovako dobijenih vrednosti napona na izlazu ne zaštićenost kola od elektromagnetnih smetnji (kolo nije oklopljeno), dodatan šum koji se javlja unutar samih operacionih pojačavača ili termički šum nastao od otpornika u povratnoj sprezi prepojačavača. Može se reći da od tačke B do tačke C očitana približno linearna kriva, dok je od tačke C do tačke D kriva apsolutno linearna. Da bi se struja precizno izmerila, ulazna struja mora biti linearna sa naponom. Najkritičnija oblast merenja je oblast između tačaka A i B, gde se za određene vrednosti napona na izlazu, ne može utvrditi struja na ulazu. Već od tačke B ka tačkama C i D kriva je linearnija i tačnost merenja je veća. Da bi se dobio bolji uvid i realno predstavila greška merenja, ponovljeno je merenje za opseg od 1 nA do 10 nA u 300 tačaka.

Na grafiku sa slike 5.6 može se videti uveličana nelinearnost sa predhodnog grafika između najkritičnijih tačaka A i B. Detaljno se može uočiti negativni izlazni napon koji linearno raste sa povećanjem struje, a onda ulazi u zasićenje uprkos rastu struje na ulazu.



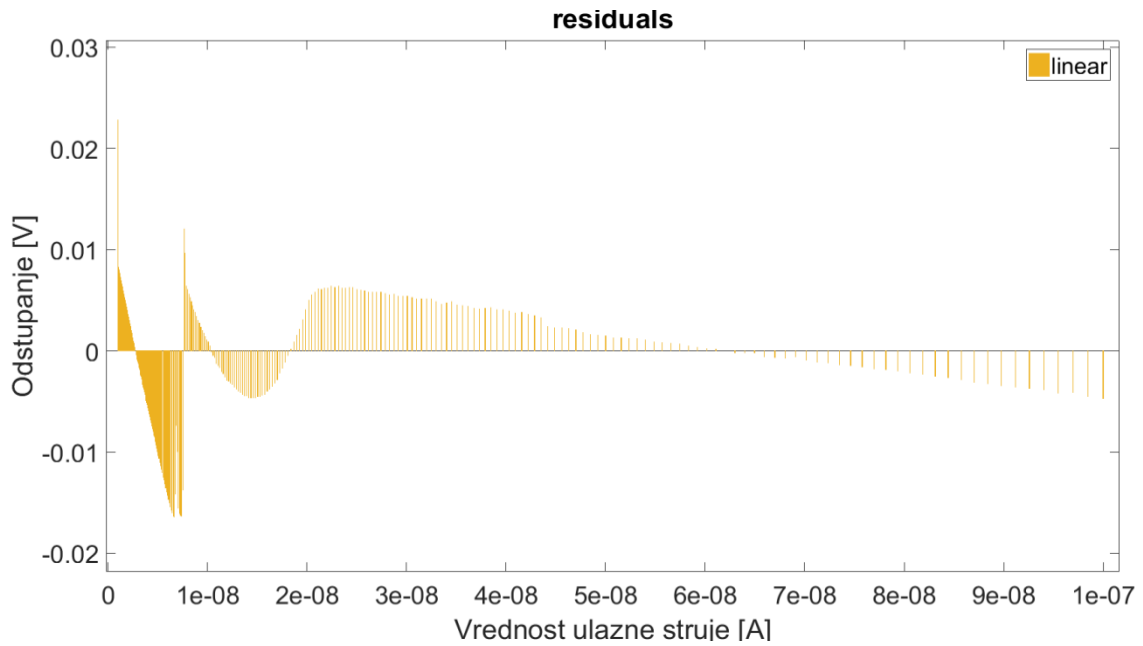
Slika 5.6 – Naponski odziv na izlazu za strujnu pobudu u opsegu 1 nA do 10 nA

Za vrednost struje u zaokruženoj crvenoj oblasti primećuje se nagli skok napona na izlazu. Kasnije se napon stabilizuje i počinje njegov linearan rast u odnosu na ulaznu struju. Praktično može se reći da elektronski sklop na osnovu prethodnih rezultata, kada nije zaštićen od EM zračenja, ima linearni naponski odziv na strujnu pobudu za minimalnu vrednost struje od 20 nA. Na slici 5.7 predstavljena je linearna funkcija napona u zavisnosti od struje na osnovu predhodno dobijenih rezultata merenja.



Slika 5.7 – Linearizacija izlaznog napona u odnosu na ulaznu struju

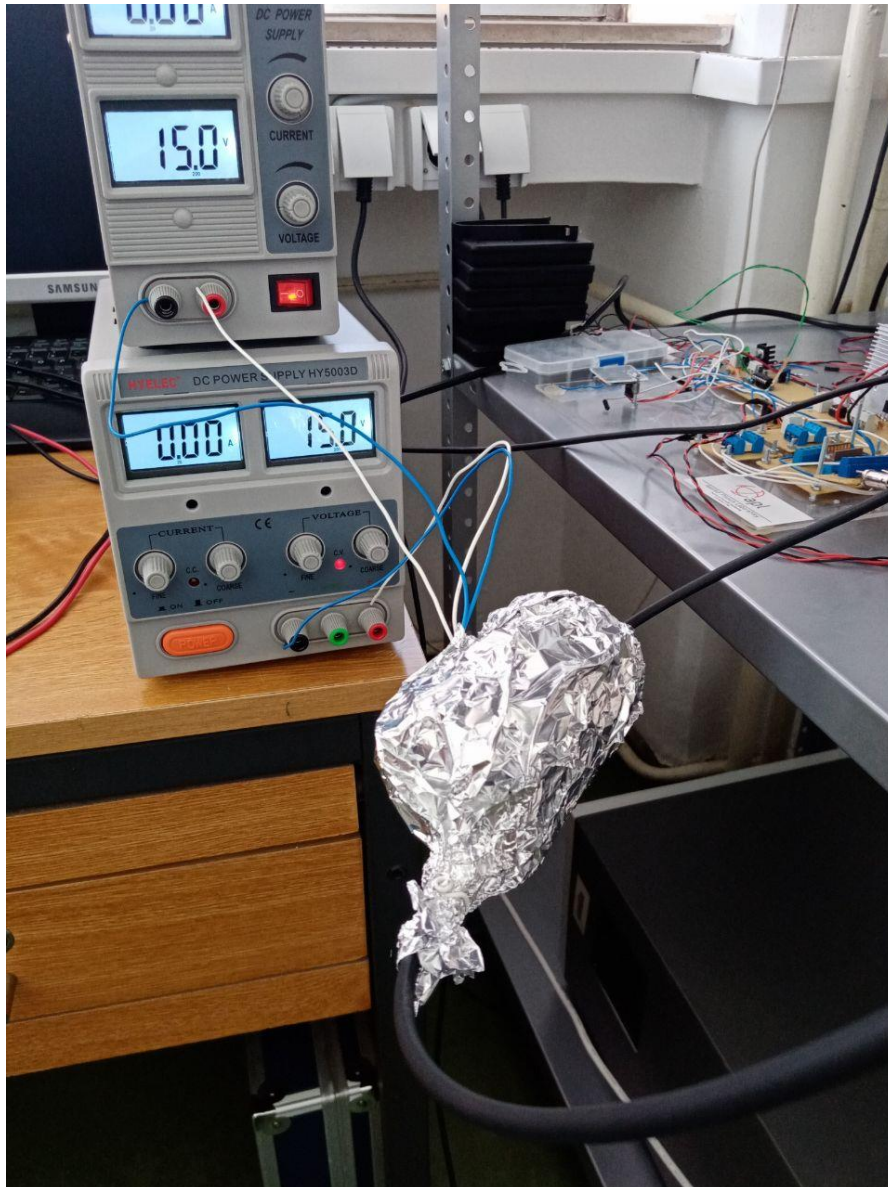
Kao što je pomenuto zbog velikog odstupanja izmerenih vrednosti od linearne funkcije u oblasti između tačaka A i B, na slici 5.8 dat je grafik odstupanja između merenih vrednosti i dobijene linearne funkcije.



Slika 5.8 – Grafik odstupanja merenja od linearizovane krive – *residual fit*

Ako posmatramo grafike sa slika 5.7 i 5.8 možemo zaključiti da je najveće odstupanje između tačaka A i B.

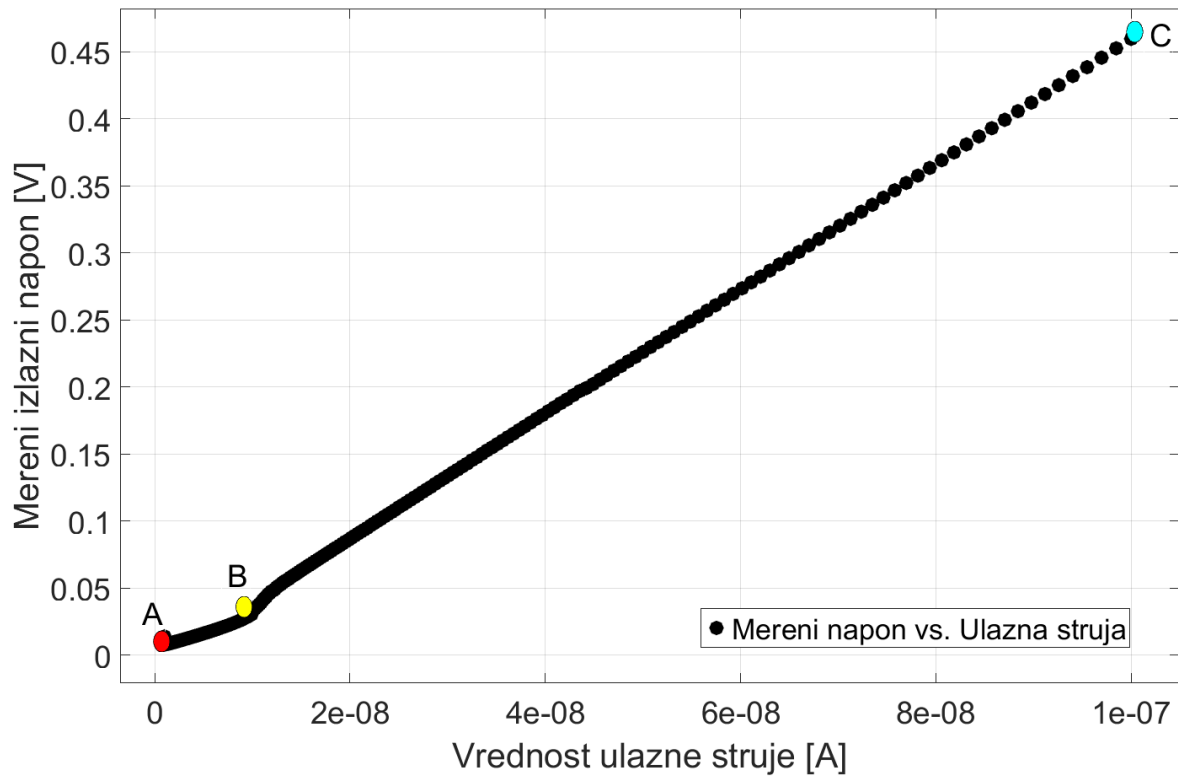
Zatim je urađeno merenje kada se elektronski sklop nalazi u improvizovanom uzemljenom oklopu. Oklop se sastojao od kartonskog šupljeg valjka koji je obložen aluminijumskom folijom. Unutar šupljeg valjka ispunjenim vazduhom se nalazi elektronski sklop. Aluminijumska folija je uzemljena preko *SMU*-a. Na slici 5.9 je ilustrovana postavka eksperimenta. Eksperiment ima zadatak da se testira zaštita od EM smetnji.



Slika 5.9 – Postavka eksperimenta sa improvizovanom zaštitom od EM smetnji

Bitno je napomeniti da je ovo merenje u cilju testiranja maksimalne preciznosti merenja izvedeno sa ugašenim mobilnim telefonom, a zbog visokih letnjih temperatura porostorija u kojoj je izvođen eksperiment je ohlađena na 25 °C. Ulazna struja je postavljena u opsegu 1 nA do 100 nA sa 300 tačaka.

Pod ovakvim uslovima eksperimenta na slici 5.10 se može videti naponski odziv elektronskog sklopa u odnosu na strujnu pobudu na ulazu kola.

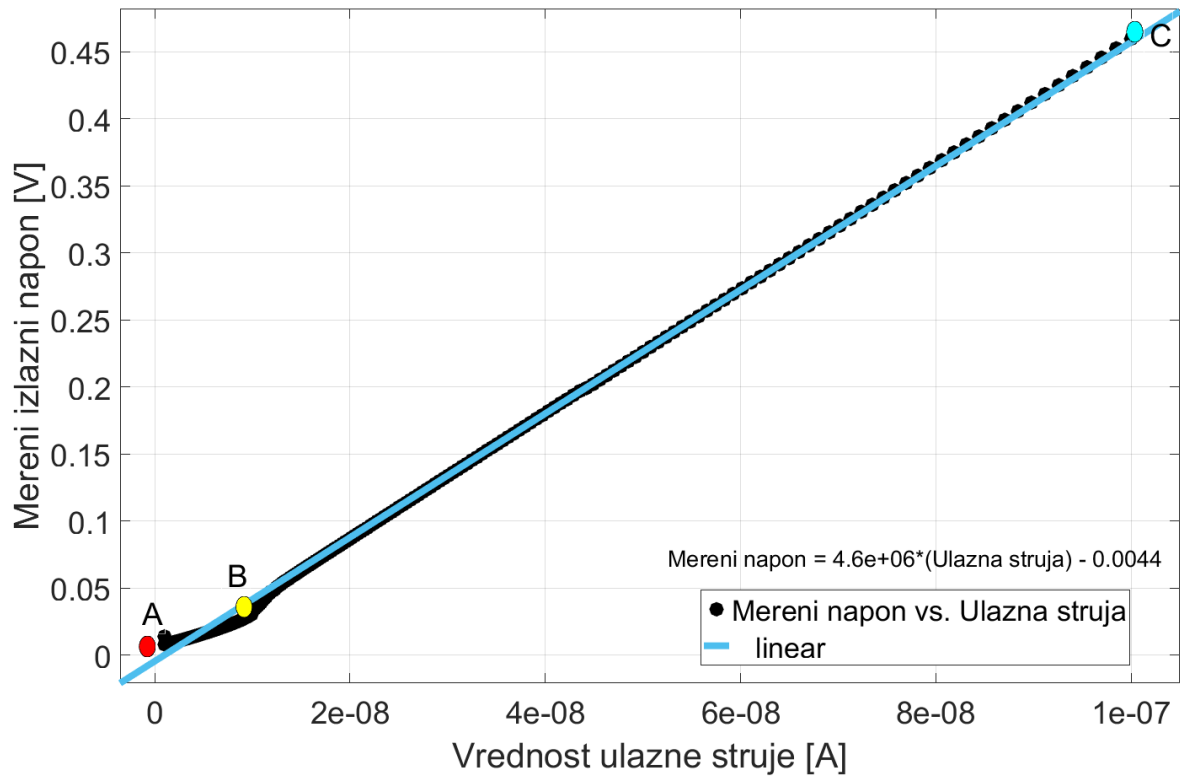


Slika 5.10 – Kriva odziva izlaznog napona za vrednost ulazne struju kada postoji zaštita od EM zračenja

Može se primetiti da se grafici sa slike 5.5 i slike 5.10 razlikuju po tome što kada je elektronski sklop oklopljen karakteristika je linearnija, čime se i dokazuje da viskofrekventno EM zračenje utiče na karakteristike rada elektronskog sklopa, bez obzira na način projektovanja i dizajn štampane ploče.

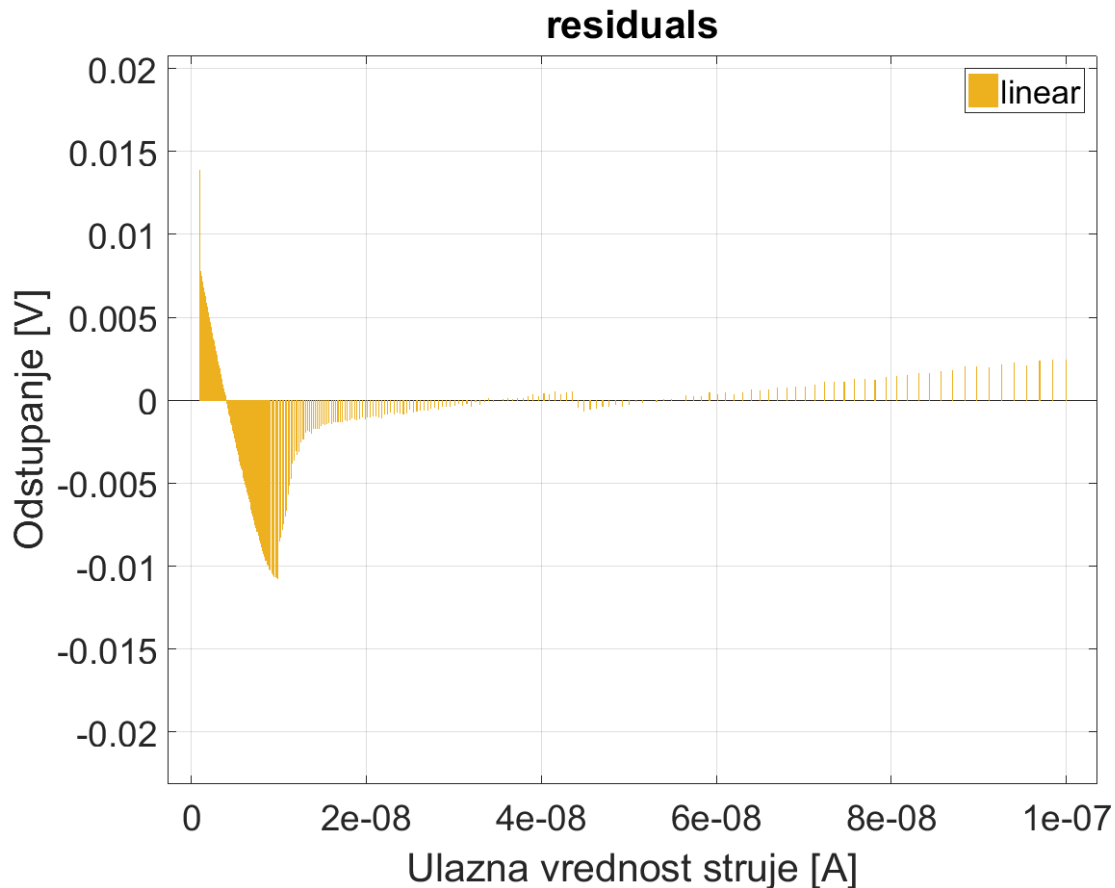
Dobar dizajn može da ublaži ili da maksimalno smanji uticaj šumova na ceo električni sklop.

Čak se i na grafiku sa slike 5.10 može uočiti određena nelinearnost krive. Ako posmatramo od tačke A do tačke B kriva je linearna, ali u okolini tačke B kriva blago poraste, a kasnije sve do tačke C kriva ima linearan rast. Na dalje je u softverskom alatu MatLab odrađen *linear fit* na dobijene rezultate sa slike 5.10.



Slika 5.11 – Linearizacija izlaznog napona u odnosu na ulaznu struju

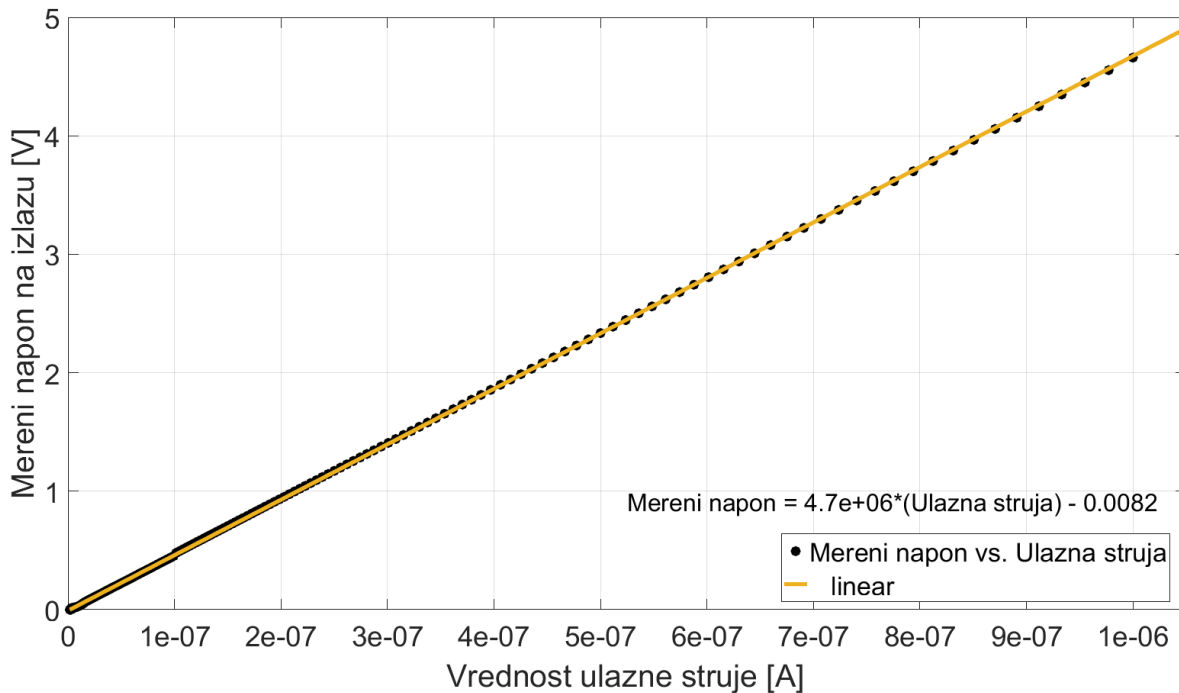
Može se primetiti da se plava prava poklapa sa tačkama merenja između oblasti tačaka B i C. Verovatnoća nesigurnosti merenja i greške se može javiti u oblasti između tačaka A i B. Što je odstupanje manje to je merenje tačnije i preciznije. Ovakva greška se može otkloniti kroz odgovarajući napisan softver za obradu i akviziciju podataka merenja. Dokaz da je manje odstupanje prilikom korišćenja oklopljavanja je dat kada se uradi *residual fit*. Odstupanje tačaka merenja i prave prikazano je grafički na slici 5.12.



Slika 5.12 – Grafik odstupanja merenja od linearizovane krive – *residual fit*

Iako je kriva linearnija u ovom slučaju, može se primetiti da i dalje postoji određen stepen nesigurnosti i greške u oblasti između tačaka A i B. Na osnovu ovih i prethodnih rezultata merenja zaključeno je da je najsigurnije merenje za struje veće od 20 nA, a da u uslovima kada je uređaj oklopljen može se izmeriti struja i od 10 nA.

U nastavku, na slici 5.13 prikazan je grafik odnosa napona i struje za ulaznu struju u opsegu od 1 nA do 1 μ A u 300 tačaka. Na grafiku se može zaključiti da kako vrednost struje na ulazu raste tako raste i stepen linearnosti izlazne karakteristike. Izlazna karakteristika je linearnija za veće vrednosti struje na ulazu. Razlog tome je taj jer je odnos korisnog signala na ulazu i šuma je veći.



Slika 5.13 – Linearizacija izlaznog napona u odnosu na ulaznu struju za opseg od 1 nA do 1 μ A u 300 tačaka

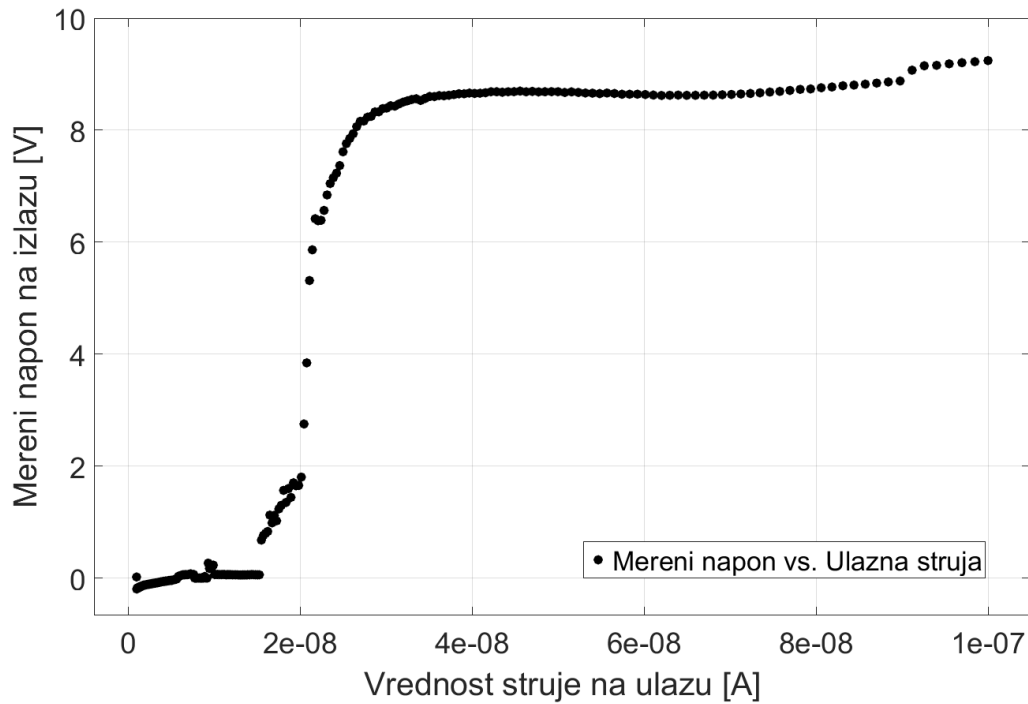
Maksimalna vrednost struje koju elektronski sklop može da detektuje, a da ne uđe u zasićenje je 3.18974 μ A.

U nastavku rezultata merenja ostalo je da se pokaže kako loše zalemljene komponente i nečistoća mogu da utiču na rezultate merenja i neispravnost rada samog elektronskog sklopa. Na slici 5.14 se nalazi grafik merenja izlaznog napona u odnosu na zadatu struju.

Primetno je da ne postoji linearan odnos između napona i struje.

Postoji velika nelinearnost na izlaznoj karakteristici kao i naglo zasićenje, odnosno zaravnjenje krive, što dokazuje netačnost i disperziju rezultata merenja od očekivane tačne vrednosti. Ovakvi rezultati pokazuju sledeće:

- Ovakva vrsta merenja, odnosno merenje niskih nivoa struje veoma osetljivo i delikatno te se mora obratiti pažnja na sam način odabira komponenti pa sve do projektovanja dizajna elektronskog sklopa
- Druga stvar je ta da se nakon projektovanja elektronskog sklopa mora sa posebnom pažnjom rukovati, a to se odnosi na lemljenje komponenata, čišćenje štampane ploče od nečistoća i pravilna postavka merenja.



Slika 5.14 – Primer lošeg rezultata merenja usled nečistoće i nepravilno zalemljene štampane ploče elektronskog sklopa

Ono što bi verovatno davalo bolje i linearnije rezultate merenja jeste da se više TIA operacionih pojačavača vežu kaskodno sa manjom vrednošću otpornika u kolu povratne sprege. To bi dovelo do manjeg termičkog šuma i veće otpornosti kola na spoljne šumove. Takođe, elektronski sklop bi trebalo da bude u oklopljenoj metalnoj kutiji koja je uzemljena. Ovim bi se rezultati merenja znatno popravili.

GLAVA 6

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat celokupni postupak projektovanja, izrade i testiranja jednog elektronskog sklopa specifične namene. Cilj rada je bio istražiti načine projektovanja i implementacije elektronskog sklopa pomoću kog se može izmeriti niski nivoi struja, a kasnije ta merenja upotrebiti u raznim primenama.

U radu je predstavljen kompletan postupak izučavanja tehničke dokumentacije, projektovanja, testiranja i prikazivanje realnih rezultata merenja. Kao što se iz predstavljenih rezultata merenja može videti, elektronski sklop ulaznu struju konvertuje u napon i pojačava je. Step linearizacije je primetan od 20 nA kada uređaj nije zaštićen od EM smetnji, a kada je zaštićen onda je izlazna kriva linearna za vrednost ulazne struje od 10 nA. Uz adekvatan matematički aparat prilikom akvizicije podataka, greška se može predvideti i umanjiti.

Kroz rad je opisana ideja, a kasnije i sam proces projektovanja elektronskog sklopa. Svaka funkcionalna celina je detaljno objašnjena, a kasnije u rezultatima merenja je dokazano da elektronski sklop ispunio projektovana očekivanja do 90 %. Ostalih 10 % jesu greške u rezultatima merenja. Da bi se te greške smanjile na minimum i povećale performanse elektronskog sklopa, kao što je veća otpornost na šumove, za naredni prototip treba iskoristiti sličan dizajn. Dva ili više predpojačavača vezanih kaskodno sa manjim otporom u povratnoj sprezi dodatno bi umaljile termički šum nastao zbog velike otpornosti u povratnoj sprezi. Kvalitetno i profesionalnije oklopljavanje elektronskog sklopa bi sprečilo problem šuma nastalog od strane visokofrekventnog elektromagnetnog zračenja. Takođe je dokazano da kada se štampana ploča oklopi rezultati merenja i performanse se poboljšavaju.

Trenutni prototip opisan u ovom radu može se upotrebiti za tačno merenje struje veće od 20 nA, a da ne mora da bude oklopljen. Ideja jeste ta da se elektronski sklop na dalje koristi za merenje generisane struje od strane inverzno polarisane PIN fotodiode izložene jonizujućem zračenju.

LITERATURA

- [1] Nadica Miljković, „Metode i instrumentacija za električna merenja“, udžbenik Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, str. 7-8, Beograd, 2016.
Dostupno na:
https://www.etf.bg.ac.rs/uploads/files/udzbenici/NMiljkovic_Metode_i_instrumentacija_za_elektricna_merenja.pdf (pristupljeno 8. jula 2020. god.)
- [2] Eiju Matsumoto, „The History of Electric Measuring Instruments and Active Components“, Society of Historical Metrology, Japan
Dostupno na: <https://ethw.org/w/images/c/c8/Matsumoto1.pdf> (pristupljeno 8. jula 2020. god.)
- [3] Dragan Denić, Predavanja iz predmeta Metrologija električnih veličina, Katedra za merenja, Elektronski fakultet Niš, str. 100-103, 2014, Niš
- [4] Slika dostupna na: <https://www.rfcafe.com/references/popular-electronics/images2/build-vacuum-tube-voltmeter-may-1959-popular-electronics-1.jpg> (pristupljeno 8. jula 2020. god.)
- [5] Slika dostupna na: <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/flukeig/articles/images-generals-web-cards/web-cards/training/6004286-card-back-dmm-history-715x360.jpg> (pristupljeno 8. jula 2020. god.)
- [6] Slika dostupna na: <https://mecharobotics.files.wordpress.com/2012/02/dsc04677.jpg>
(pristupljeno 8. jula 2020. god.)
- [7] M. Anđelković, U. Jovanović, G. S. Ristić, „Realizacija dva pojačavača na bazi transimpedansnog pojačanja za merenje niskih nivoa jednosmernih struja u dozimetrijskim aplikacijama“, Zbornik radova XXVI Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, str. 349-353, Tara, 12-14. oktobar 2011.
- [8] Goran Ristić, Predavanja iz predmeta Dozimetrija i dozimetri, Katedra za mikroelektroniku, Elektronski fakultet Niš. Šk. god. 2016/17.
- [9] Tehnička dokumentacija naponskog regulatora LM7805 dostupna na:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/178.pdf> (pristupljeno 15. jula 2020. god.)
- [10] John Caldwell “Single-Supply, 1 MHz „ Photodiode Amplifier Reference Design TIDU535” Texas Instruments, November 2014.
Dostupno na: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu535/tidu535.pdf>
(pristupljeno 16. jula 2020. god.)
- [11] Zoran Prijić, Aneta Prijić „Uvod u poluprovodničke komponente i njihovu primenu“, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, str. 72-74, elektronsko izdanje, Niš, 2020.
Dostupno na: <http://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/Poluprovodnici.pdf>
(pristupljeno 16. jula 2020. god.)
- [12] Raphael Puzio, Luis Chioye “Simplify Transimpedance Applications with High bandwidth, Precision JFET Op Amps” , Texas Instruments, May 2019.
Dostupno na: <https://www.ti.com/lit/an/sboa354/sboa354.pdf> (pristupljeno 16. jula 2020. god.)
- [13] Tehnička dokumentacija operacionog pojačavača OPA129U dostupna na:
<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/BurrBrown/mXvswtx.pdf>
(pristupljeno 16. jula 2020. god.)

- [14] Miloš Petrović, Predavanja iz predmeta Savremena merenja u tehnologiji, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, Maj 2019.
Dostupno na satju: <https://elektrotehnika.tmf.bg.ac.rs/SMBT-2019/SMBT-2019-5.pdf>
(pristupljeno 16. jula 2020. god.)
- [15] Tehnička dokumentacija PIN fotodiode BPW34 dostupna na:
<https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf> (pristupljeno 18. jula 2020. god.)
- [16] Zoran Prijić, slajdovi sa predavanja iz predmeta Analogna mikroelektronika- Operacioni pojačavači i primena, Elektronski fakultet Niš, 2020.
Dostupno na:
http://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/2017/10/Literatura/Analogna/Analogna_Opamps.pdf
(pristupljeno 18. jula 2020. god.)
- [17] Tehnička dokumentacija instrumentacionog pojačavača INA121U dostupna na:
https://www.ti.com/lit/ds/sbos078/sbos078.pdf?ts=1595795608490&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
(pristupljeno 19. jula 2020. god.)
- [18] Olivera R. Pronić, Nataša Maleš Ilić, Predavanja iz predmeta Mikrotalasna tehnika i elektronika, poglavlje Mikrostrip, Elektronski fakultet u Nišu, 2017.
- [19] Zoran Prijić, Slajdovi sa predavanja iz predmeta Projektovanje štampanih ploča
Dostupno na: <http://mikro.elfak.ni.ac.rs/predmeti/projektovanje-stampanih-ploca/>
(pristupljeno 08. avgusta 2020. god.)
- [20] On-line kalkulator prolagođenja karakteristične impedanse:
Dostupno na: https://www.changpuak.ch/electronics/Coplanar_Waveguide_Calculator.php
(pristupljeno 10. avgusta 2020. god.)