

Precizni sustav za mjerenje napona niske frekvencije

Kaužljjar, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:491089>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 161

**PRECIZNI SUSTAV ZA MJERENJE NAPONA NISKE
FREKVENCije**

Nikola Kaužljar

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 161

**PRECIZNI SUSTAV ZA MJERENJE NAPONA NISKE
FREKVENCije**

Nikola Kaužljar

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 161

Pristupnik: **Nikola Kaužljjar (0036516218)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektronika
Mentor: prof. dr. sc. Igor Krois

Zadatak: **Precizni sustav za mjerenje napona niske frekvencije**

Opis zadatka:

Projektirati i realizirati precizni sustav za mjerenje napona niske frekvencije. Očekivani opseg napona treba biti od 0 V do 10 V uz maksimalnu frekvenciju promjene napona od 0,5 Hz. Očekivana točnost sustava bi trebala biti 0,05 % u opsegu temperatura okoline od 15° do 30° C. Sustav treba imati sklopove za zaštitu ulaznog stupnja od strujnog preopterećenja te pojave napona suprotnog polariteta. Na ulazu u mjerni sustav treba realizirati podešavanje amplitude napona u svrhu prilagođenja napona ulazu A/D pretvarača. Kod mehaničke izvedbe mjernog sustava pozornost treba obratiti na hlađenje komponenata te njihovo ožičenje.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 161

**PRECIZNI SUSTAV ZA MJERENJE
NAPONA NISKE FREKVENCije**

Nikola Kaužljjar

Zagreb, lipanj 2024.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Zahtjevi mjernog sustava i blok shema.....	2
1.1. Zahtjevi mjernog sustava.....	2
1.2. Blok shema.....	3
2. Analogni mjerni sustav.....	4
2.1. Analogno digitalna pretvorba.....	4
2.2. Ulazno diferencijalno pojačalo.....	6
2.3. Naponska referenca.....	9
2.4. Poništavanje termonapona.....	11
2.5. Ulazna zaštita i filtriranje.....	13
2.6. Izvor stabilnog napona za naponsku referencu.....	17
2.7. Izvor analognog napajanja za analogno digitalni pretvornik.....	18
2.8. Izvor zaštitnih napona.....	19
3. Digitalni upravljački sustav.....	21
3.1. Mikrokontroler.....	21
3.2. Izolacija signala.....	23
3.3. USB komunikacija.....	24
4. Brojčani prikaz.....	25
4.1. Prikaz podataka.....	25
4.2. Upravljanje mjernim sustavom od strane korisnika.....	26
5. Napajanje.....	27
5.1. Pretvorba sa mrežnog izmjeničnog napona na istosmjerni međunapon.....	27
5.2. Napajanje digitalnog upravljačkog sustava i brojčanog prikaza.....	28
5.3. Napajanje analognog mjernog sustava.....	29
6. Izvedba tiskanih pločica.....	33
6.1. Analogni mjerni sustav.....	33
6.2. Digitalni upravljački sustav.....	37
6.3. Brojčani prikaz.....	38
6.4. Napajanje.....	39
7. Algoritam digitalnog upravljačkog sustava.....	41
7.1. Opis osnovnog rada digitalnog upravljačkog sustava.....	41
7.2. Umjeravanje mjernog sustava.....	42
8. Mehanička izvedba mjernog sustava.....	43
8.1. Kućište i ožičenje.....	43
9. Mjerenja točnosti sustava.....	45
9.1. Korišteni mjerni uređaji i mjerna postava.....	45
9.2. Ispitivanje sklopa za poništavanje termonapona.....	46
9.3. Mjerenje struja curenja.....	47
9.4. Mjerenje točnosti mjernog sustava.....	48
Zaključak.....	50
Literatura.....	51
Sažetak.....	52

Summary.....	53
---------------------	-----------

Uvod

Precizno mjerenje napona ima veliku primjenu u znanstvenim istraživanjima. Ono se može mjeriti komercijalnim mjernim uređajima ili se po potrebi mogu dizajnirati specijalni mjerni uređaji za konkretan tip eksperimenta. Komercijalni mjerni uređaji imaju veliku prednost jer nije potrebno utrošiti vrijeme, a posljedično i novac na razvoj uređaja uz veliki izbor mjernih opsega koji se mogu koristiti na različitim eksperimentima. Ako eksperiment zahtjeva korištenje velikog broja mjernih uređaja i poznati i jedinstveni mjerni opseg i mjerenu veličinu, komercijalni uređaji počinju biti neekonomični. Primjer takvog uređaja je precizni 8.5 znamenkasti voltmetar pod nazivom HPM7177 koji su inženjeri iz CERN-a dizajnirali.

1. Zahtjevi mjernog sustava i blok shema

1.1. Zahtjevi mjernog sustava

Zadani mjerni opseg sustava iznosi 0 V do 10 V te zadana točnost iznosi 0.05% pune skale, odnosno svako mjerenje mora biti unutar ± 5 mV od stvarne vrijednosti. Frekvencijski raspon mjerenja je od 0 Hz do 0.5 Hz. Temperaturni raspon rada mjernog sustava je od 15°C do 30°C, odnosno mjerni sustav je predviđen za laboratorijske uvjete. Mjerni sustav se napaja iz napajanja gradske mreže sa predviđenim naponom od 230 V $\pm 15\%$. Zahtjevi za maksimalnom potrošnjom ne postoje.

Mjerni sustav mora imati veliku izolaciju od gradske mreže kako struje curenja ne bi imale utjecaj na mjerenje koji bi radio grešku veću od ± 5 mV. Očekivane struje curenja (AC na 50 Hz) moraju biti 1 μ A ili manje.

Mjerni sustav ima vremenski period od paljenja nakon kojeg mora imati pouzdano mjerenje. Kod mjernih uređaja sa puno većim točnostima je često vrijeme od 90 minuta, te će ovaj mjerni sustav preuzeti isti vremenski period.

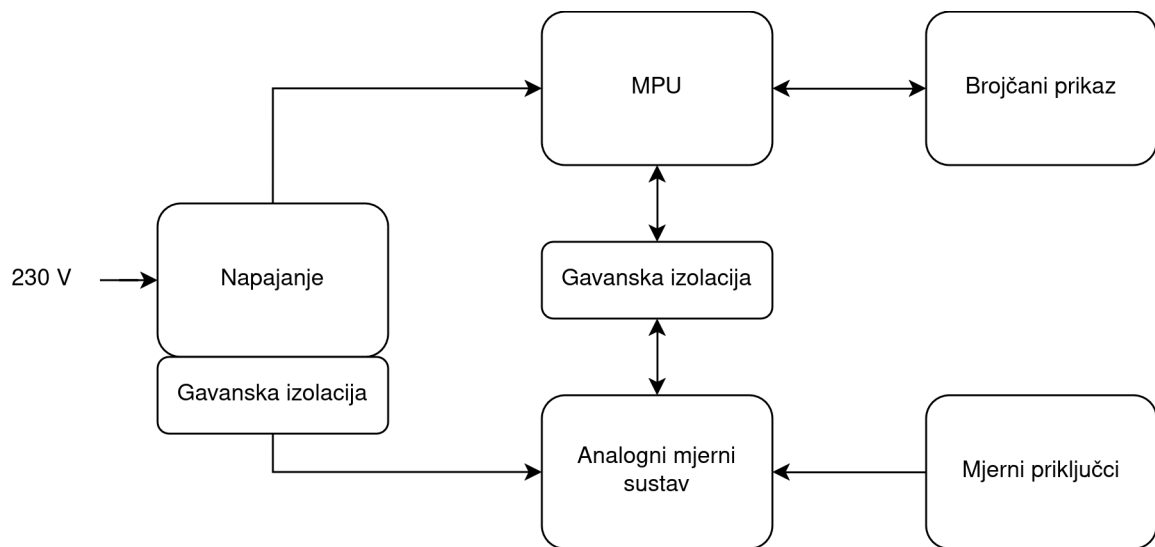
Ulazna impedancija mjernog sustava na zadanom frekvencijskom rasponu mora biti veća ili jednaka 10 M Ω .

1.2. Blok shema

Cijeli mjerni sustav se sastoji od četiri glavna dijela:

- analogni mjerni sustav
- digitalni upravljački sustav (MPU)
- brojčani prikaz
- napajanje

Analogni mjerni sustav i digitalni upravljački sustav moraju biti galvanski izolirani kako bi se dodatno povećala izolacija između mjernih priključaka i gradske mreže.



Sl 1.1 Blok shema mjernog sustava

2. Analogni mjerni sustav

2.1. Analogno digitalna pretvorba

Analogno digitalni pretvornik direktno utječe na preciznost i točnost cijelog sustava. Ciljana točnost sustava određuje minimalnu rezoluciju i maksimalnu integralnu nelinearnost pretvornika. Minimalna potrebna rezolucija analogno digitalnog pretvornika računa se prema izrazu (1) te za potrebe točnosti od 0.05% za ovaj mjerni sustav zahtjeva rezoluciju od minimalno 11 bitova. S obzirom na utjecaj integralnih nelinearnosti analogno digitalnog pretvornika i šum potrebno je uzeti pretvornik sa većom rezolucijom od 11 bita. Također, potrebno je uzeti u obzir prikaz podataka na zaslonu. Točnost od 5 mV zahtjeva rezoluciju od 1 mV na dekadskom prikazu, te se izrazom (1) dobije minimalna potrebna rezolucija od 14 bitova.

$N = \log_2 \left(\frac{X_{max}}{X_{min}} \right)$	(1)
---	-----

Uz dovoljno veliku rezoluciju analogno digitalnog pretvornika, integralna nelinearnost punog mjernog opsega mora biti manja od 0.05%. U obzir treba uzeti i ostale tolerancije mjernog sustava, koje je potrebno kompenzirati povećanjem mjernog opsega analogno digitalnog pretvornika. Faktor povećanja mjernog opsega ne smije biti prevelik kako bi se minimizirao nepotreban gubitak rezolucije i utjecaj pogreški analognog sustava prije analogno digitalnog pretvornika.

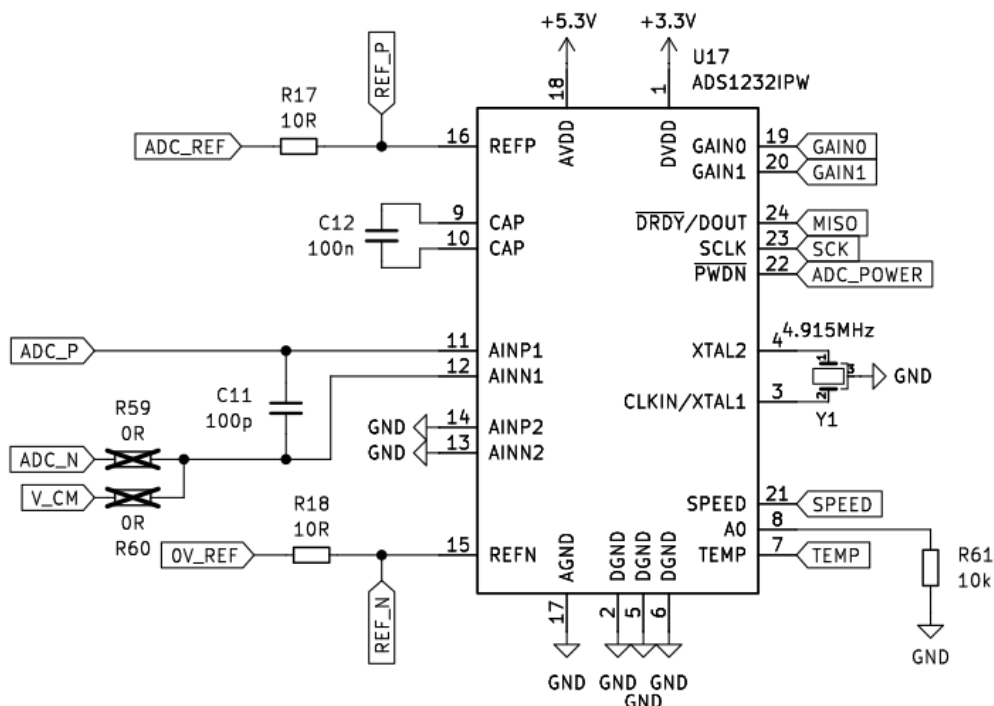
Mjerni sustav zahtjeva preciznost na frekvencijama do 0.5 Hz, te velika brzina pretvornika nije potrebna. S obzirom da niska cijena nije uvjet, preferirana arhitektura je delta sigma zbog manjeg kvantizacijskog šuma od ostalih arhitektura.

Integrirani analogno digitalni pretvornici dolaze sa unaprijed definiranim frekvencijom ili frekvencijama uzorkovanja. Po Nyquist–Shannon teoremu minimalna frekvencija uzorkovanja mora biti duplo veća od maksimalne frekvencije sustava, odnosno za ovaj mjerni sustav minimalna frekvencija uzorkovanja mora biti 1Hz. Veća frekvencija

uzorkovanja se može smanjiti kasnijom obradom podataka u mikrokontroleru ali je bitno da je frekvencija uzorkovanja pretvornika cjelobrojna.

Uz prethodno zadane uvjete, odabran je integrirani analogno digitalni pretvornik ADS1232. ADS1232 je 24-bitni delta-sigma analogno digitalni pretvornik sa diferencijalnim ulazom. Diferencijalni ulaz na analogno digitalnom pretvorniku omogućava jednostavnije rješenje za zaštitu od negativnog napona na ulazu mjernog uređaja, jer omogućava pretvorbu i kvantizaciju negativnog napona do iste apsolutne razine kao i za što je mjerni sustav namijenjen. Diferencijalni ulaz također omogućuje preklapanje polariteta ulaznog napona za poništavanje termonapona opisanog u poglavlju 2.4. Izabrani pretvornik ima veću rezoluciju i manju integralnu linearnost od minimalne zahtjeva, no ne donosi povećanje cijene. Na slici 2.1 je vidljiva shema analogno digitalnog pretvornika. Na shemi se nalaze dva otpornika koji su prekriženi, što označava da nije planirano montiranje tih komponenti iako za njih postoji predviđeno mjesto na tiskanoj pločici. Montiranjem R59 ili R60 se može birati hod ulaznog napona, čime se može kompenzirati problemi opisani u poglavlju 2.2.

Problem frekvencijskog preklapanja je riješen unutar integriranog kruga ADS1232 i vanjskog kondenzatora C12 vidljivog na slici 2.1.



Sl. 2.1 Shema analogno digitalnog pretvornika

2.2. Ulazno diferencijalno pojačalo

Potrebe ulaznog diferencijalnog pojačala su niski šum, maleni napon pomaka uz malen temperaturni koeficijent napona pomaka i mali temperaturni koeficijent pojačanja. Iz tehničkih podataka od analogno digitalnog pretvornika ADS1232, najveći preporučeni napon reference je 5.3 V, te najveći diferencijalni napon na ulazu je $\pm 0.5 V_{ref}$ (uz unutarnje pojačanje analogno digitalnog pretvornika od 1). S obzirom na da je najveći dopušteni napon manji od najvećeg predviđenog ulaznog napona mjernog sustava, potrebno je prilagoditi ulazni napon diferencijalnim pojačanjem manjim od 1. Pojačanje diferencijalnog pojačala manjeg od 1 isključuje mogućnost korištenja instrumentacijskog pojačala, jer instrumentacijska pojačala ne mogu imati pojačanje manje od 1. Pogodno je koristiti što veći napon reference kako napon pomaka i temperaturni koeficijent operacijskog pojačala u krugu imali manji utjecaj na mjerenje. Frekvencijski raspon ulaznih napona od 0 Hz do 0.5 Hz upućuje na veliki oprez oko $1/f$ šuma kod pojačala, dok je širokopojasni šum manje bitan. Navedeni uvjeti upućuju na korištenje samonulirajućeg ili *čoperskog* operacijskog pojačala. Napon napajanja operacijskog pojačala je isti kao i za analogno digitalni pretvornik, te je ograničen naponskom referencom. Uz sve prethodno opisane zahtjeve, odabrano je operacijsko pojačalo OPA388.

Sljedeći kritični problem je otporna mreža koja podešava diferencijalno operacijsko pojačalo. Potrebna je velika temperaturna usklađenost između otpornika te velika usklađenost omjera između otpornika. Potreba za niskim šumom i izbjegavanjem $1/f$ šuma uvjetuje da se korištenje karbonskih otpornika svakako mora izbjegavati.

Korištenje uparenih otpornih mreža kao što je LT5400 je preferirana opcija. LT5400 sadrži četiri uparena otpornika sa unaprijed postavljenim omjerima otpora, malim temperaturnim koeficijentom omjera otpora, velikom usklađenosti otpora te dugotrajnom vremenskom stabilnošću. Iz potrebe za redundancijom, paralelno sa otporničkom mrežom dodani su i pojedinačni otpornici.

Maksimalno diferencijalno pojačanje računa se izrazom (2). Napon reference čiji je odabir opisan u poglavlju 2.3 iznosi približno 5 V, maksimalni predviđeni ulaz mjernog sustava iznosi 10 V, iz čega se izrazom (2) dolazi do maksimalnog pojačanja od 0.25. Ako se u obzir uzmu dostupni omjeri LT5400 serije otporničkih mreža kao i tolerancije komponenti, izabrano je pojačanje od 0.2, odnosno otpornička mreža sa omjerom 1:5.

$A_{diff} = \frac{U_{ref}/2}{U_{ul}}$	(2)
---------------------------------------	-----

LT5400 serija je također komponenta koja zadovoljava specifičnu *nišu* te je teško zamjenjiva u slučaju nedostatka komponenti na tržištu. Iz tog razloga dodan je još jedno pojačalo sa pojačanje od -1 kako bi se na analogno digitalni pretvornik mogao dovesti potpuno diferencijalni napon i efektivno povećati pojačanje 2 puta i koristiti otporničku mrežu sa omjerom 1:10.

Iako integrirani analogno digitalni pretvornik ima ugrađen filter frekvencijskog preklapanja, širokopolasni šum koji ulazi u pretvornik pridodaje konačnom uzorkovanom šumu. Širokopolasni šum može se kompenzirati niskopropusnim filterom. Frekvencija filtera ne smije biti preniska kako se vrijeme stabilizacije napona ne bi nepotrebno povećavalo. Gornja granična frekvencija je proizvoljno odabrana te iznosi oko 7 kHz, te se izrazom (3) računa potrebni kapacitet kondenzatora u filteru koji iznosi oko 22 nF.

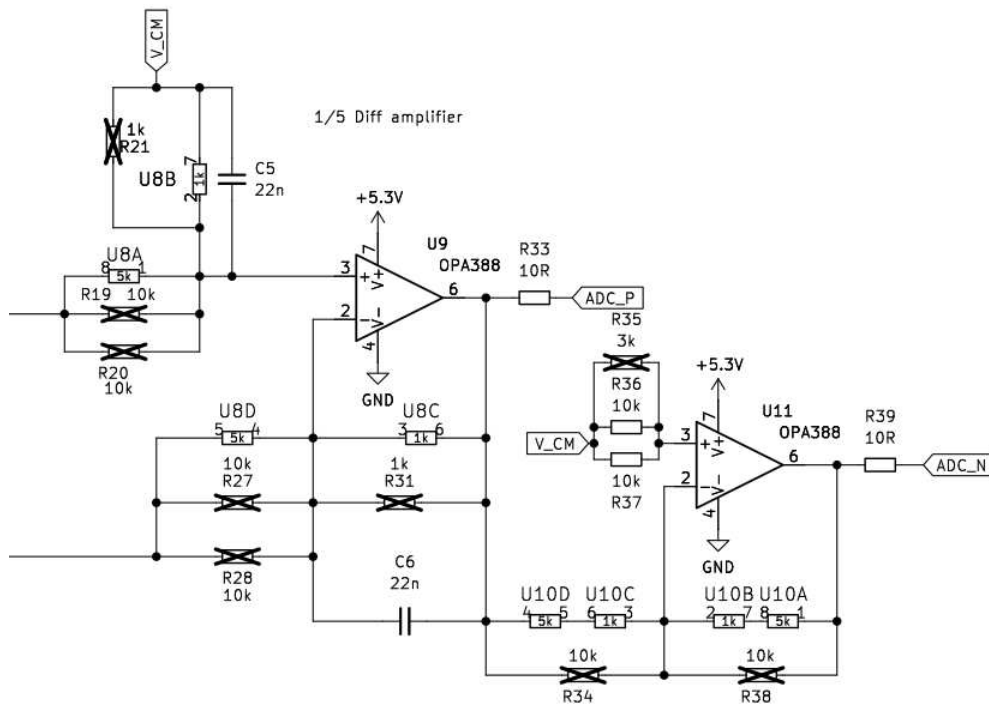
$C = \frac{1}{2\pi R f_c}$	(3)
----------------------------	-----

Na slici 2.2 može se vidjeti simulacija frekvencijskog odziva diferencijalnog pojačala simuliranog u programu LTSpice. Korišten je pojednostavljeni model operacijskog pojačala sa parametrima pojačanja otvorene petlje i umnoška pojačanja i širine frekvencijskog opsega. Ulazni i izlazni otpori operacijskog pojačala mogu se zanemariti.

Na slici 2.2 vidljiva je konačna shema ulaznog diferencijalnog pojačala.



SI 2.2 Simulacija frekvencijskog odziv diferencijalnog pojačala



SI 2.3 Shema ulaznog diferencijalnog pojačala

2.3. Naponska referenca

Za potrebe preciznog mjerenja potrebno je imati i naponsku referencu koja je temperaturno stabilna, vremenski stabilna, ima niski šum i ima malenu dinamičku impedanciju. Kod preciznih referenci potrebno je birati između velike dugotrajne stabilnosti i inicijalne točnosti. S obzirom da se ovaj mjerni sustav može kalibrirati u mikrokontroleru, inicijalna točnost nije presudna. Temperaturna stabilnost upućuje korištenje *bandgap* reference ili reference sa zener diodama sa ugrađenim grijačem. Cijene preciznih referenci baziranih na zener diodama nisu znatno više od preciznih *bandgap* referenci, dok su manji termalni koeficijent i dugotrajna stabilnost poželjniji. Pažnju je potrebno obratiti i na kućište same komponente. Većina integriranih referenci dolazi u plastičnim ili keramičkim kućištima. Iako manje koštaju, plastična kućišta nisu pogodna jer imaju svojstvo upijanja vlage iz zraka, čime jako utječu na stabilnost napona.

Za pouzdana i ponovljiva mjerenja šum reference od vrha do vrha ne bi smio biti veći od zadnje znamenke na prikazu, koja iznosi 1 mV. Ako se uzme diferencijalno pojačanje u obzir, naponski šum od vrha do vrha naponske reference ne smije biti veći od 200 μ V.

Uz zadane uvjete, izabrana je naponska referenca ADR1399, referenca sa zener diodom i ugrađenim grijačem. Za niski dinamički napon reference bitno je pažljivo podesiti struju reference. Iz tehničkih podataka ADR1399, preporučena je struja od 3 mA. Za stabilnost napona potrebno je koristiti i stabilan izvor struje za referencu. Stabilni strujni izvor struje izveden je pomoću stabilnog izvora napajanja opisanog u poglavlju 2.6 i otpornika.

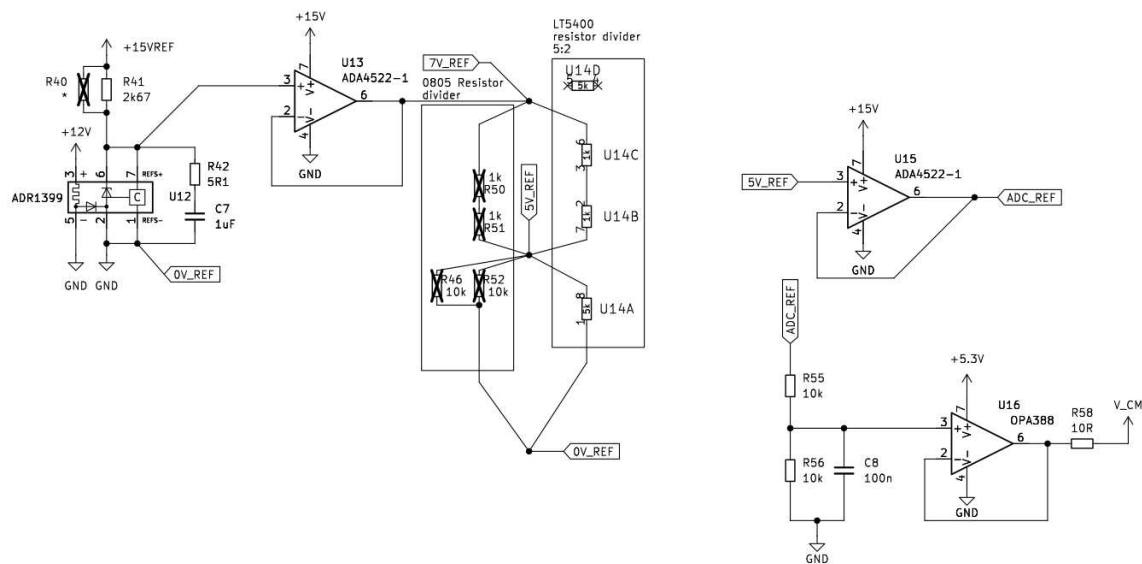
Napon reference iznosi 7.05 V, te se mora prilagoditi na oko 5 V za analogno digitalni pretvornik. Kao i kod diferencijalnog pojačanja, za ovu primjenu je jako bitna temperaturna stabilnost otporničke mreže. Otproničkom mrežom LT5400 sa omjerom 1:5 dobije se otpornička mreža sa omjerom 5:7 kojom se 7.05 V prilagodi na 5.04 V.

Potrebno je uzeti u obzir i inicijalnu točnost reference. Iz izraza (4) moguće je izračunati konačni mjerni opseg mjernog sustava. Za minimalni napon od 6.75 V, maksimalni mjerni opseg mjernog iznosi 12.05 V te zadovoljava zahtjeve mjernog sustava. Za maksimalni napon od 7.3 V napon reference iznosi 5.21 V, te je manji od maksimalnog napona reference analognog digitalnog pretvornika.

$U = \pm \frac{U_{ref}}{2} \times \frac{5}{7} \times \frac{1}{A_{diff}}$	(4)
--	-----

Kako relativno niski otpor otporničke mreže ne bi utjecao na struju kroz referencu, dodano je operacijsko pojačalo u spoju naponskog sljedila. Problem relativno visokog izlaznog otpora otporničke mreže rješava se na isti način. Za analogni digitalni pretvornik i diferencijalno pojačalo potrebno je generirati zajednički napon. Kako bi se postigao optimalni hod napona, zajednički napon iznosi pola napona reference, te njegova stabilnost nije kritična jer se poništava sa diferencijalnim ulazom na analogni digitalnom pretvorniku. S obzirom da je napon naponske reference i referentni napon za ADC veći ili jednak naponu napajanja i maksimalnom dopuštenom naponu napajanja OPA388, za ovu svrhu koriste se ADA4522-2 operacijska pojačala. Njihov izbor opisan je u poglavlju 2.5.

Shema cjelokupnog izvora referentnog napona nalazi se na slici 2.4.



Sl. 2.4 Shema izvora referentnog napona

2.4. Poništavanje termonapona

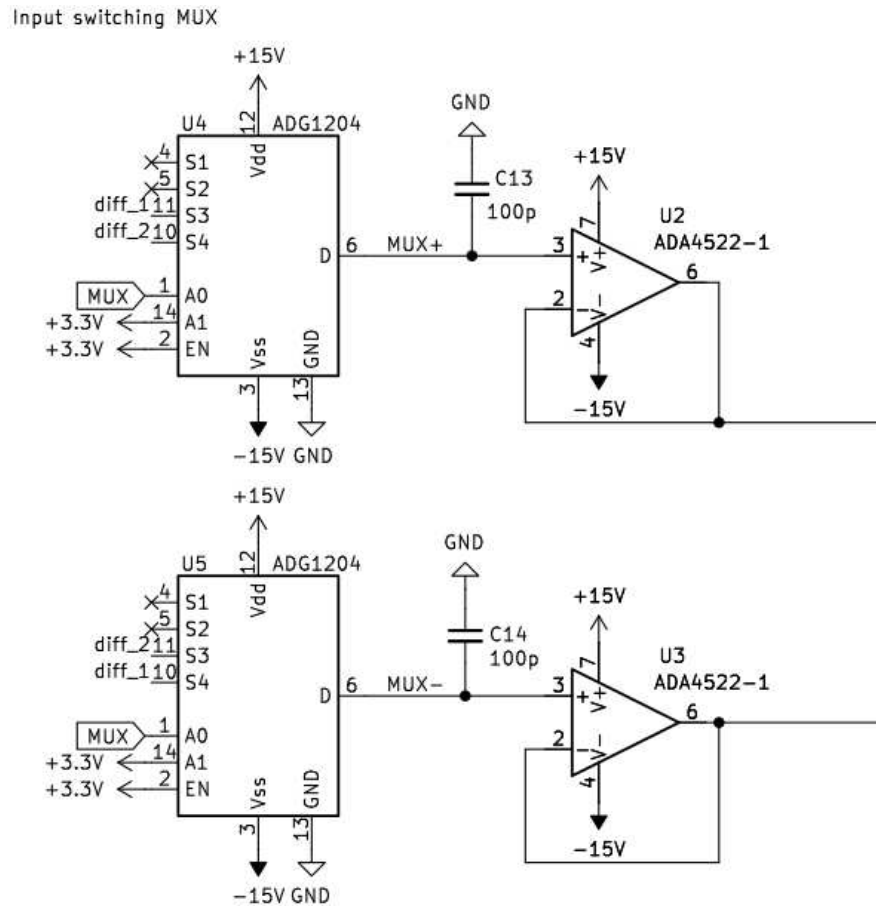
Kako bi se smanjio utjecaj napona generiranih temperaturnim gradijentom na tiskanoj pločici na lemnim spojevima koristi se preklapanje polariteta ulaznog napona. Mijenjanjem polariteta ulaznog napona, ne mijenja se polaritet termonapona. Usrednjavanjem dva mjerenja u mikrokontroleru sa obrnutim polaritetom ulaznog napona poništava se termonapon.

Preklapanje polariteta postiže se koristeći dva 2:1 multipleksera. Kod izbora multipleksera ključno je izabrati multiplekser sa minimalnom injekcijom naboja iz kanala kako se prilikom preklapanja ne bi unosila prevelika greška. Također, potrebno je odabrati multiplekser sa dovoljno visokim naponom napajanja u skladu sa opsegom ulaznog napajanja i ulazne zaštite. Na izlaz multipleksera potrebno je dodati i kapacitet koji će “upiti” injektirani naboj.

Odabrani multiplekser je ADG1204. Iz tehničkih podataka dostupna je informacija da je iznos injektiranog naboja manji od 1 pC. Izrazom (5) može se izračunati iznos pogreške napona. Sa kapacitetom od 100 pF iznos pogreške iznosi 10 mV. Iako 10 mV prelazi zahtjev o točnosti od 0.05%, potrebno je uzeti u obzir da se napon pogreške prikazuje kao zajednički napon na diferencijalnom stupnju, te se pogreška napona vidi samo kao razlika naboja dvaju multipleksera. Iz tehničkih podataka nije moguće izračunati maksimalnu razliku injektiranog naboja te će biti potrebno eksperimentalno provjeriti utjecaj ove greške.

$\Delta U = \frac{q}{c}$	(5)
--------------------------	-----

Otpor CMOS sklopki unutar ADG1204 iznosi 120Ω te u seriji sa diferencijalnim pojačalom opisanim u poglavlju 2.2 unose grešku i temperaturnu nestabilnost. Zato je na izlaze multipleksera potrebno staviti naponska slijedila. Na slici 2.5 vidljiva je shema sklopa za preklapanje polariteta ulaznog napona. Signali diff_1 i diff_2 na slici 2.5 predstavljaju pozitivni, odnosno negativni priključak ulaznog napona iz ulazne zaštite.



Sl. 2.5 Shema sklopa za preklapanje polariteta ulaznog napona

2.5. Ulazna zaštita i filtriranje

Za ulaznu zaštitu koristi se višestupanjska zaštita. Kako bi ulazna impedancija ostala maksimalno konstantna kroz cijeli naponski opseg i kako se ne bi stvarala pogreška na relativnoj velikoj ulaznoj impedanciji, potrebno je koristiti zaštitne elemente sa niskom strujom curenja.

Prvi stupanj zaštite su plinski odvodnici. Plinski odvodnici imaju zanemarivo niske struje curenja i veliku količinu energije koje mogu upiti ali nisu učinkoviti kod brzih tranzijenata (kao što je izbijanje elektrostatskog naboja na ulaz), imaju veliku toleranciju napona izbijanja i iznosi napona izbijanja su previsoki za da bi samostalno štitili ulaz mjernog sustava. Plinski odvodnici su odabrani po najniže dostupnom naponu izbijanja od 70 V.

Kako je ulazni diferencijalni napon od 70 V prevelik i ošteti bi ulazna operacijska pojačala, koristi se ograničavanje napona sa diodama. Na svakoj priključnici nalaze se dvije diode koje vode prema zaštitnim izvorima napona od +5.6 V odnosno -5.6 V. Zaštitni izvori napajanja od $\pm 5.6\text{V}$ omogućuju mjerenje diferencijalnih napona bez utjecaja ulazne zaštite do $\pm 11.2\text{ V}$.

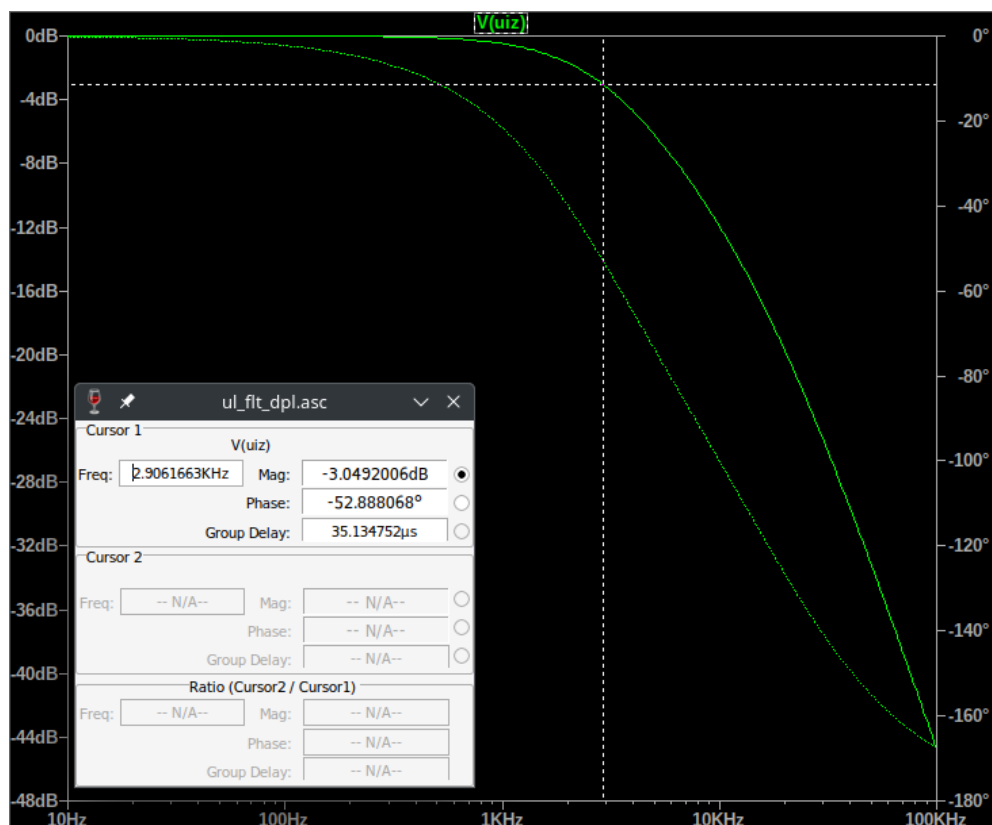
Veliki nedostatak ovakve zaštite za sklopove sa visokom impedancijom je veliki utjecaj reverznih struja curenja dioda. Struje curenja stvaraju konstantnu grešku i jaku temperaturnu ovisnost te greške. Uz pažljiv izbor komponenti odabrane su zaštitne diode DPAD20 sa jako niskim maksimalnim reverznim strujama curenja od -20 pA (uz temperaturu od 20 °C). Nedostatak ovih dioda je visoka cijena (u odnosu na generičke diode) i relativno niske maksimalne dopuštene struje dioda.

Kako bi se ograničila struja koja prolazi kroz diode, dodani su i otpornici u seriju. Maksimalni napon izbijanja odabranih plinskih odvodnika iznosi 90V, dok maksimalna preporučena struja dioda iznosi 50 mA. Ako se uzmu u obzir tolerancije otpornika i zalihost, za iznos serijskog otpora treba biti oko 1 k Ω . Za potrebe filtriranja opisanog u kasnijem dijelu ovog poglavlja i kako bi se snaga prilikom aktivacije ulazne zaštite bolje rasporedila, ukupni otpor je raspoređen na dva otpornika od 470 Ω . Sa ulaznim serijskim otpornicima od 470 Ω , može se izračunati konačna maksimalna struja ulazne zaštite prije nego što plinski odvodnik na ulazu provede struju prema izrazu (6) i iznosi 41.22 mA. Kako ne bi došlo do oštećenja vodova na tiskanoj pločici i drugih serijskih komponenti prilikom izbijanja plinskog odvodnika, dodani su i rastalni osigurači u seriju u iznosu od 62.5 mA.

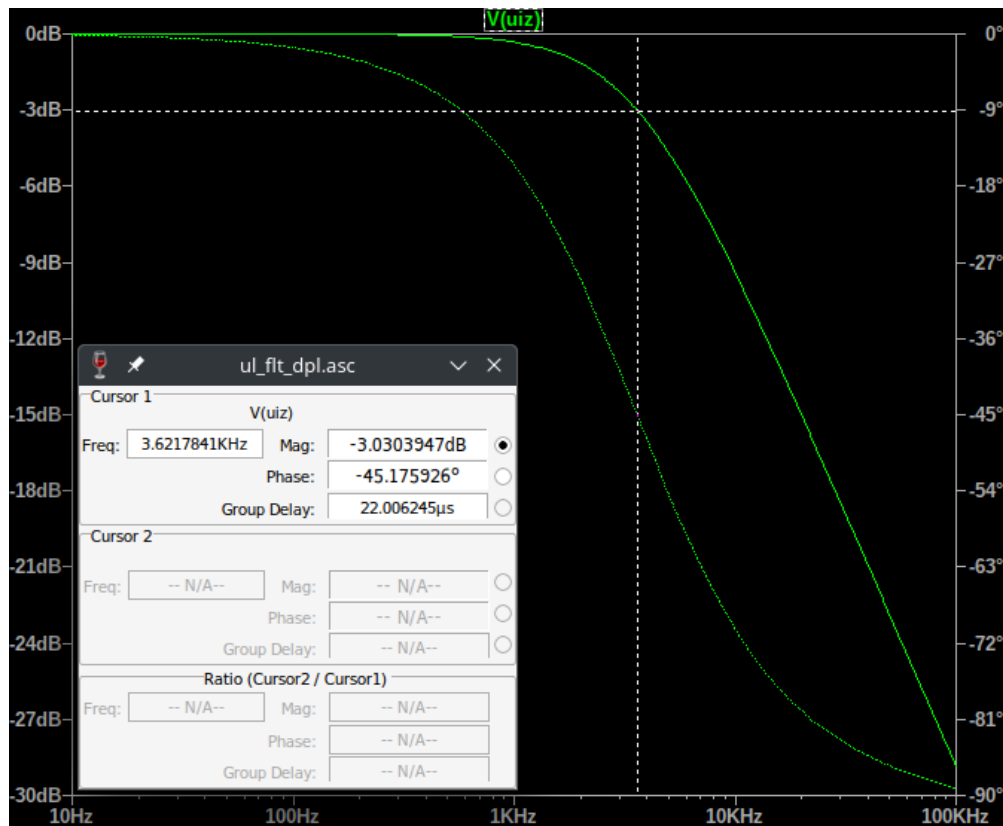
$$I = \frac{0.5U_{max} - (0.65 + 5.6)}{2R_s} \quad (6)$$

Ulazni filter sastoji se od diferencijalnog filtera i filtera zajedničkih smetnji. Diferencijalni filter se sastoji od dvostupanjskog pasivnog RC filtera sačinjenog od otpornika R7, R8, R9 i R10 te kondenzatora C1 i C2 vidljivih na slici 2.8. Dvostupanjska topologija filtera pomaže u brzini odziva na skokovitu pobudu dok zadržava relativno nisku gornju graničnu frekvenciju. Potrebno je napomenuti i da prethodno navedeni otpornici čine i ulaznu zaštitu. Pažnju je potrebno obratiti i na tehnologiju otpornika, karbonski otpornici su nepoželjni zbog povećanog 1/f šuma. Za smetnje sa brzim tranzijentima dodani su i dva induktiviteta od 10 μH. Konačna gornja granična frekvencija iznosi 2.9 kHz.

Zajednički filter čine također otpornici R7, R8, R9, R10 zajedno sa kondenzatorima C3 i C4 te prigušnica sa zajedničkim modom FL1.



Sl. 2.6 Simulirani frekvencijski odziv diferencijalnog filtera



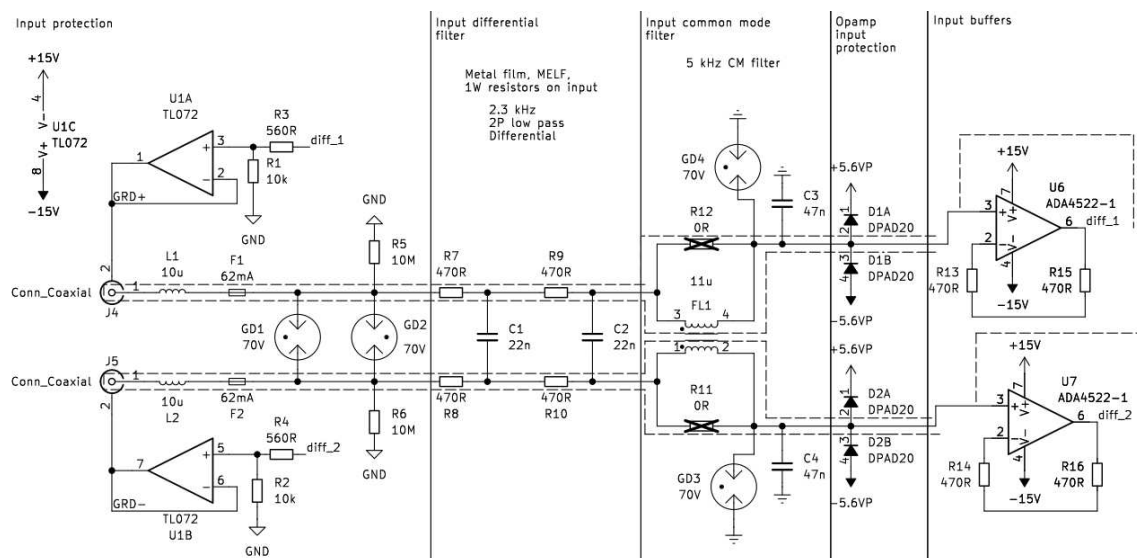
Sl. 2.7 Simulirani frekvencijski odziv filtera zajedničkih smetnji

Na kraju ulazne zaštite i filtriranja dolaze naponska sljedila koja prilagođuju područje napona iz velike impedancije u područje male impedancije. Karakteristike operacijskog pojačala su slične kao i za operacijsko pojačalo opisano u poglavlju 2.2, ali sa potrebnim razinama šuma, termalnim koeficijentom napona pomaka i naponom pomaka smanjenim za faktor 5. Također, operacijsko pojačalo namijenjeno za ovu upotrebu mora moći podržati i napon napajanja od ± 15 V. Odabrano je samunulirajuće operacijsko pojačalo ADA4522-1. Iako slično kao i OPA388, ADA4522-1 ima puno bolje karakteristike od zahtjeva (zahvaljujući samonulirajućoj topologiji) i odabrano je kako bi se maksimalno minimizirao $1/f$ šum.

Ako na ulazu nema spojenog izvora, otpornici R5 i R6 sa slike 2.8 dopuštaju strujama namještanja operacijskih pojačala da teku. Također, uloga prethodno navedenih otpornika je stvaranje diferencijalnog para ulaznog napona sa zajedničkim naponom od 0 V. Kako bi se smanjila greška nastala ulaznim strujama podešavanja operacijskog pojačala, dodana su dva serijska para otpornika od 470Ω u povratnu vezu operacijskog pojačala.

Za slučaj da se u praktičnoj primjeni pokaže potreba za oklopljenim kablovima koji bi spajali konektore na šasiji uređaja i tiskanu pločicu, dodana su lema mjesta za spajanje oklopa od kabela. Za slučaj da se struje curenja unutar kabela pokažu problematične, oklop se ne referencira na 0 V, nego na atenuirani napon koji prolazi kabelom. Kako kapacitet kabela ne bi negativno utjecao na preciznost i stabilnost ulaznih operacijskih pojačala, za oklop se koriste generička operacijska pojačala TL072H u spoju naponskog sljedila sa otpornim djelilom na ulazu. Iz tehničkih podataka operacijskog pojačala TL072H, maksimalni dozvoljeni kapacitet tereta je 300 pF, što je više nego dovoljno za kraći oklopljeni kabel.

Na slici 2.8 je vidljiva cjelokupna shema sklopa za ulaznu zaštitu i filtriranje.



Sl. 2.8 Shema sklopa za ulaznu zaštitu i filtriranje

2.6. Izvor stabilnog napona za naponsku referencu

Preciznost naponske reference ovisi direktno i o stabilnosti struje koja prolazi kroz nju. Napon koji napaja referencu mora, u manjoj mjeriti od same reference, biti temperaturno stabilan te imati malu izlaznu impedanciju. Regulacijski sklop se temelji oko TL431 naponske reference. TL431 je podesiva *bandgap* referenca sa referentnim naponom od 2.5V. Vrijednost izlaznog napona regulira se preko otpornog dijelila prema izrazu (7).

$U = 2.5\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$	(7)
---	-----

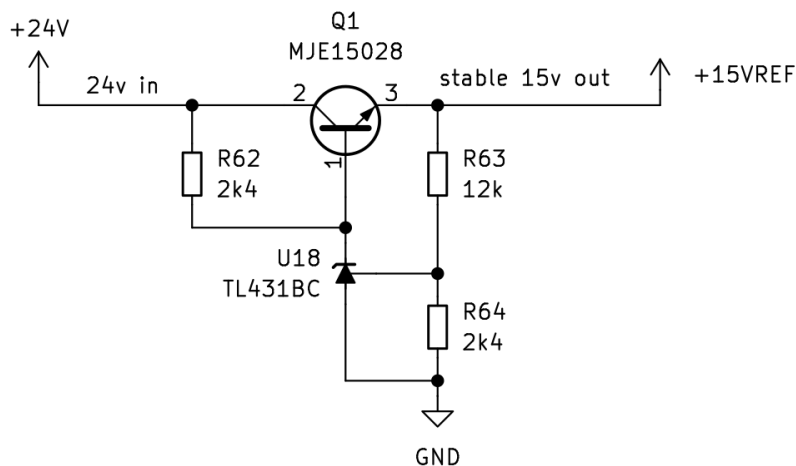
Kako bi se dodatno smanjila izlazna impedancija TL431 i povećala maksimalna izlazna struja, koristi se tranzistor kao naponsko sljedilo na izlazu reference.

Potrebno je napomenuti kako povratna veza reference utječe na dinamičku impedanciju i temperaturni koeficijent. Faktor kojim se povećava temperaturni koeficijent i dinamička impedancija računa se prema izrazu (8).

$K = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$	(8)
--	-----

Iz tehničkih podataka o TL431 vidljivo termalni pomak napona kroz cijeli temperaturni rang iznosi 14 mV. Uz povratnu vezu, termalni pomak napona iznosi 84 mV. Naponski pomak od 84 mV na naponskoj referenci uzrokuje promjenu napona od 0.35 μ V.

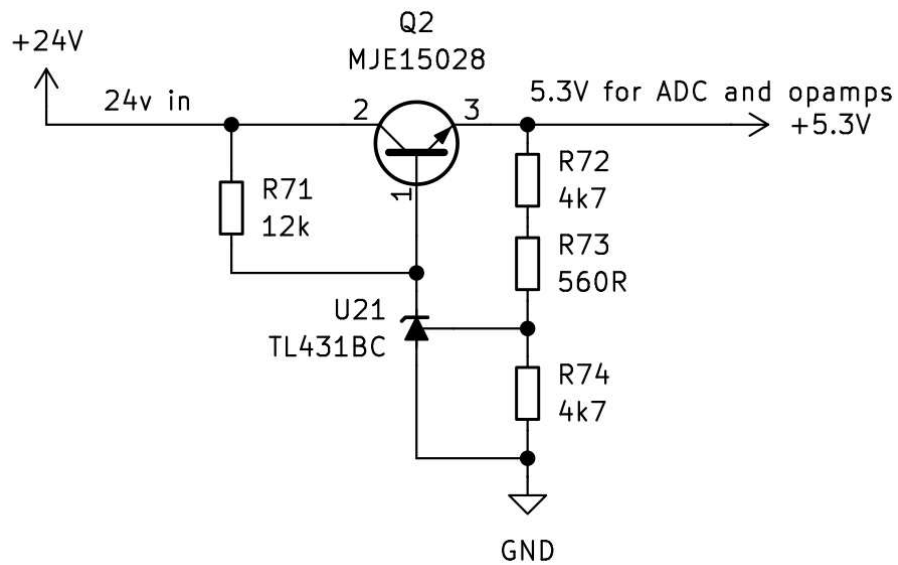
Na slici 2.9 vidljiva je shema izvora napona za naponsku referencu.



Sl. 2.9 Shema izvora napona za naponsku referencu

2.7. Izvor analognog napajanja za analogno digitalni pretvornik

Za napajanje analognog digitalnog pretvornika i operacijskog pojačala OPA388 potrebno je generirati napon napajanja od 5.3 V, kako bi mogao biti veći od maksimalnog dopuštenog napona naponske reference. Za generiranje prethodno navedenog napona koristi se ista shema iz poglavlja 2.6 sa modificiranim vrijednostima otpornika u povratnoj vezi. Shema 5.3 V izvora nalazi se na slici 2.10.



Sl. 2.10 Shema 5.3 V izvora napajanja

2.8. Izvor zaštitnih napona

U poglavlju 2.5. opisana je zaštita sa ograničenjem napona pomoću dioda. Prekomjerna ulazna struja se odvodi prema ovim napajanjima i ne mogu se koristiti klasična linearna napajanja kao što su opisana u poglavljima 2.6. i 2.7. jer ona nemaju mogućnost odvoda struje. Za ovakvu upotrebu, pogodno bi bilo koristiti zener diode ili *shunt* naponske reference kao što je TL431. Prednost zener diodi je da dolaze u kućištima koje mogu izdržati velike snage generirane na samim diodama. Glavni nedostatak je da za postizanje stabilnog napona je potrebna konstantna struja iz samog napajanja, čime se postiže nepotrebno grijanje tiskane pločice i nepotrebna potrošnja energije. Alternativno, mogu se koristiti naponske *shunt* reference koje zahtjevaju puno manje struje za podešavanje od zener diodi. Njihov glavni nedostatak je da nisu dobavljive u kućištima koje mogu podnijeti veliku snagu na sebi.

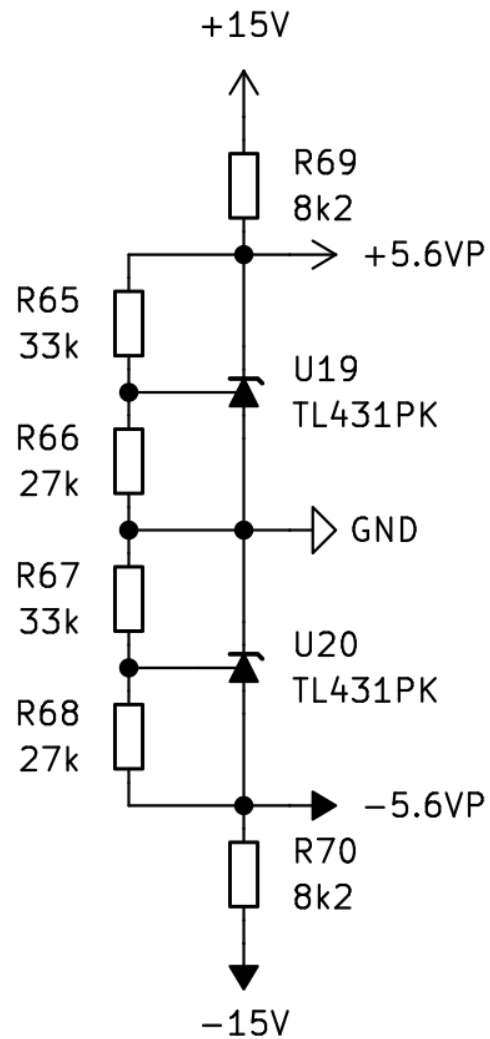
Potrebna snaga koju zaštitni element treba disipirati se umnoškom maksimalne struje zaštite izračunate u poglavlju 2.5. i iznosa zaštitnog napona, te iznosi 0.23 W.

Idealno kućište za korištenje u ovom slučaju je sa što manjim termalnim otporom između samog silikonskog integriranog kruga i ambijenta. Prema izrazu (9) može se izračunati prirast temperature komponente prilikom disipacije energije. TL431 u SOT-89 kućištu pruža najniži termalni otpor koji iznosi 52 °C/W. Prirast temperature izračunat izrazom (9) iznosi 12°C, te je apsolutna temperatura za najveću temperaturu okoline za koju je uređaj namijenjen iznosi 42°C.

$$\Delta T = R_{tja} P$$

(9)

Struja koja teče kroz naponske reference prilikom normalnog naponskog opsega na ulazu mjernog sustava iznosi 1.15 mA. Na slici 2.11 vidljiva je shema generatora zaštitnih napona.

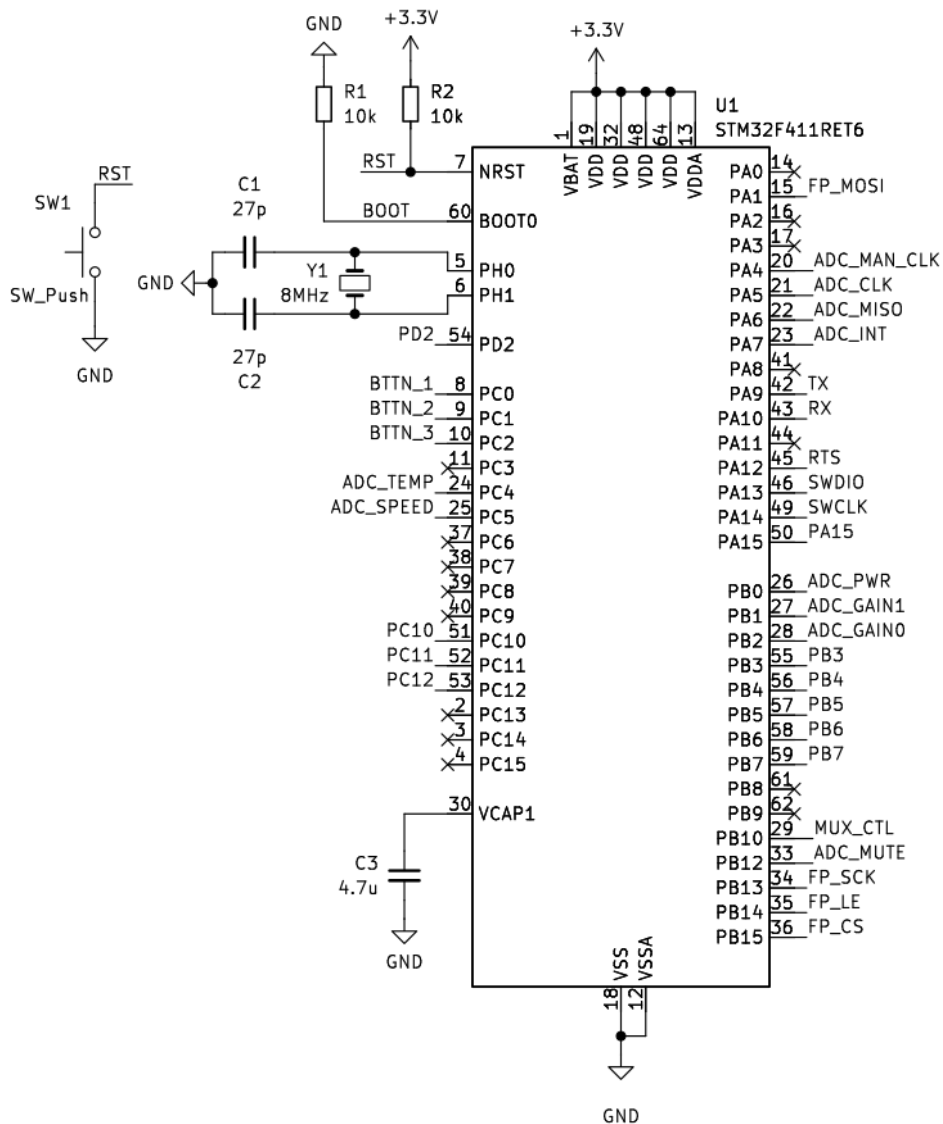


Sl. 2.11 Shema generatora zaštitnih napona

3. Digitalni upravljački sustav

3.1. Mikrokontroler

Upravljanje cijelim sustavom odvija se na mikrokontroleru STM32F411RET6. STM32F411RET6 koristi 32-bitni procesor baziran na ARM M4 jezgri. M4 jezgra podržava korištenje unutarnje *floating-point* jedinice za brže računanje sa realnim brojevima. Predviđena frekvencija rada jezgre je 100 MHz. Napon napajanja digitalnog sustava je 3.3 V.



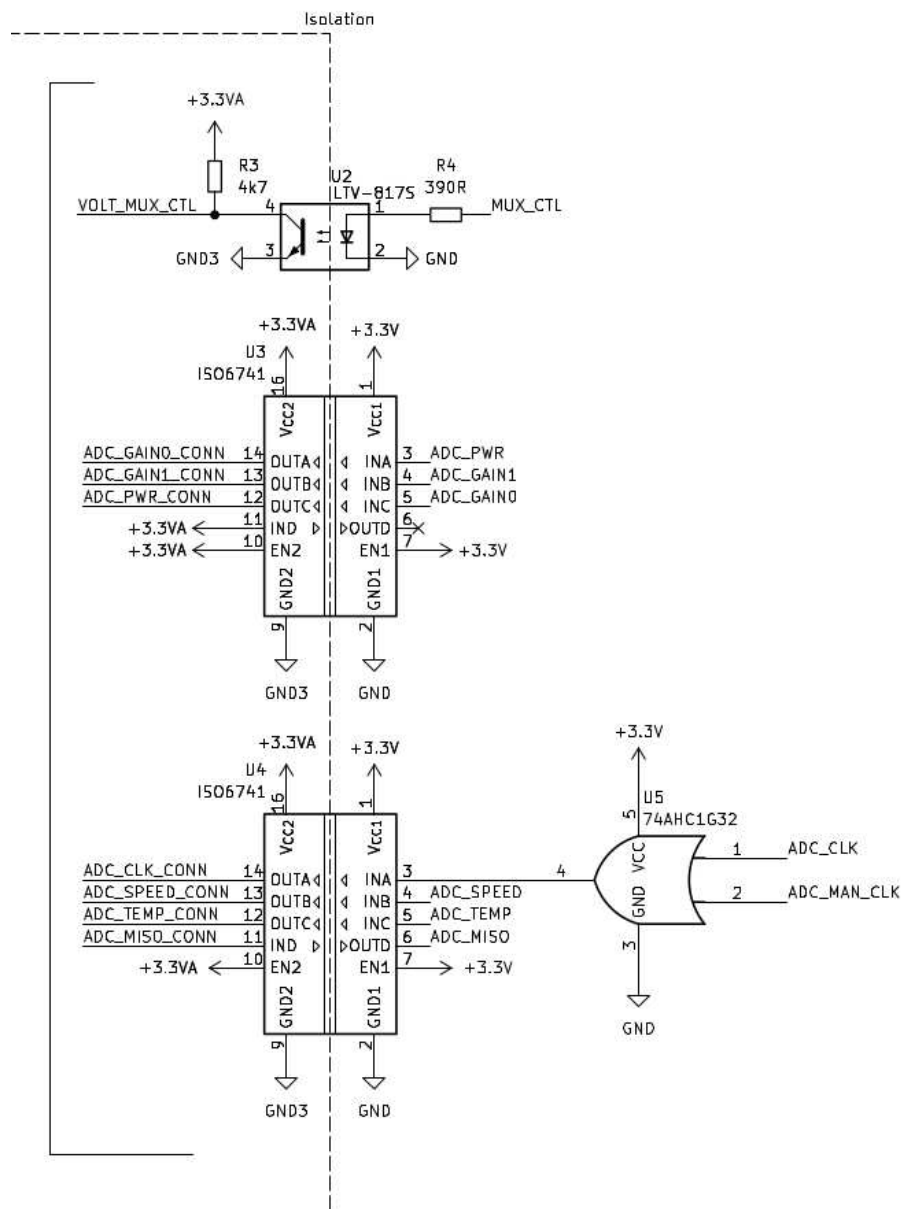
Sl. 3.1 Shema spajanja mikrokontrolera

Takt za jezgru se generira oscilatorom integriranim u mikrokontroler sa vanjskim kvarcnim kristalom. Korišten je kvarcni kristal sa rezonantnom frekvencijom od 8 MHz. Ukupni kapacitet tereta potreban za kristal iz tehničkih podataka iznosi 18 pF, te se vrijednost kapaciteta vanjskih kondenzatora može izračunati prema izrazu (10) gdje je C_L potrebni kapacitivni teret uz pretpostavku da je parazitivni kapacitet tiskane pločice oko 5 pF i da oba kondenzatora imaju jednaku vrijednost kapaciteta. Izrazom (10) dobiju se vrijednosti vanjskih kondenzatora od 26 pF, odnosno 27 pF kako bi se mogli odabrati kondenzatori iz E12 niza vrijednosti.

$C = 2(C_L - 5 \text{ pF})$	(10)
-----------------------------	------

3.2. Izolacija signala

Kako bi digitalni upravljački sustav i analogni mjerni sustav mogli komunicirati uz galvansku izolaciju, koriste se digitalni izolatori signala. Odabrani su generički izolatori ISO6741 sa 3/1 komunikacijom. Broj signala koje digitalni upravljački sustav šalje prema analognom mjernom sustavu je sedam, za koje bi bilo potrebno dodati treći izolator koji bi koristio samo jedan od četiri kanala. Za jedan dodatni kanal koristi se optički sprežnik. Shema spajanja izolatora i optičkog sprežnika vidljiva je na slici 3.2.

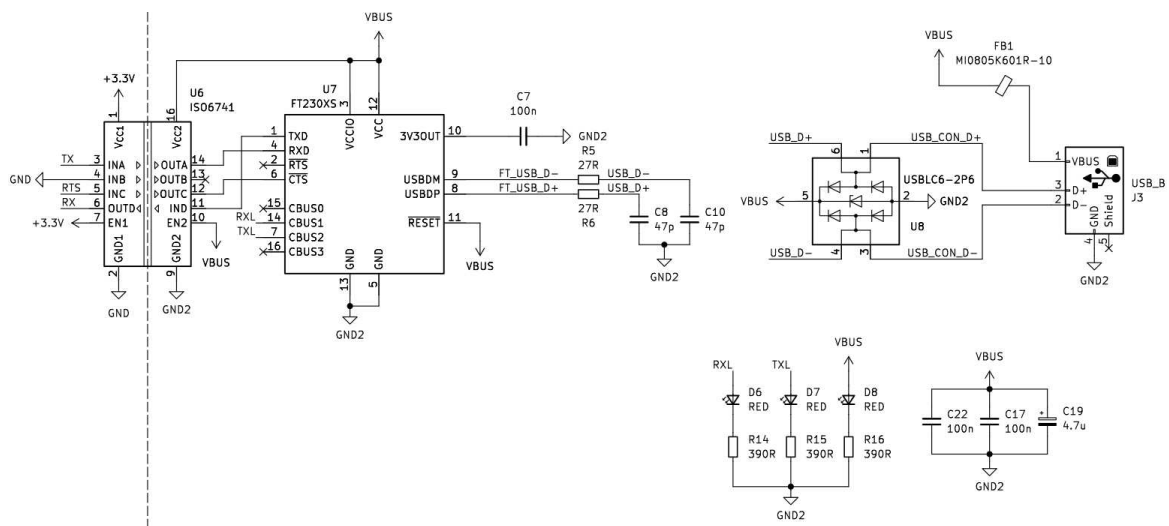


Sl. 3.2 Shema spajanja izolacije digitalnih signala

3.3. USB komunikacija

Umjeravanje mjernog sustava zahtjeva zahtjevniju kontrolu i unos podataka od onog koji je opisan u poglavlju 4.2. Također, korisno je imati dodatnu kontrolu nad mjernim sustavom kako bi se lakše ispitao rad sustava.

Dodatna komunikacija i kontrola sa mjernim sustavom izvedena je preko USB UART sučelja baziranog oko FT230XS integriranog sklopa. Spajanje mjernog uređaja i osobnog računala uvodi niz problema vezanih uz smetnje koje dolaze iz napajanja računala. Potrebno je galvanski izolirati i komunikaciju između računala i mikrokontrolera, odnosno komunikaciju između mikrokontrolera i FT230XS integriranog sklopa. Na slici 3.3 se nalazi shema USB UART komunikacije i potrebne galvanske izolacije signala.



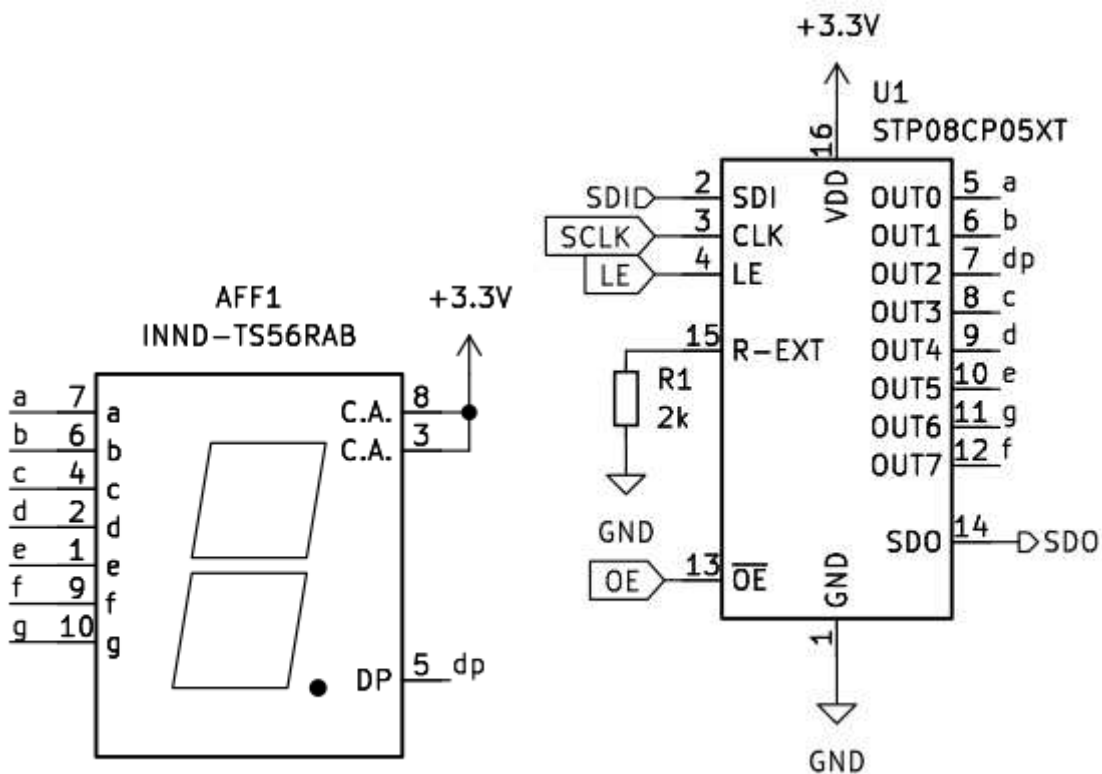
Sl. 3.3 Shema USB UART sučelja

4. Brojčani prikaz

4.1. Prikaz podataka

Prednji panel za prikaz podataka koristi osam 7-segmentnih LED pokazivača. Iako minimalna potrebna rezolucija prikaza zahtjeva pet znamenki, dodane su još tri znamenke kako bi se mogla dodatno izmjeriti preciznost mjernog sustava. Kako bi se smanjile smetnje koje generira prikaz, svaki LED pokazivač pogoni STP08CP05XT integrirani sklop. Prethodno navedeni sklop integrira serijski registar sa izlaznim strujnim ponorima, gdje se iznos struje regulira jednim vanjskim otpornikom. Ovime se smanjuje potrebna količina komponenti i komunikacijskih linija koje idu sa digitalnog upravljačkog sustava prema brojčanom prikazu. Podešena struja svakog segmenta pokazivača je 10 mA.

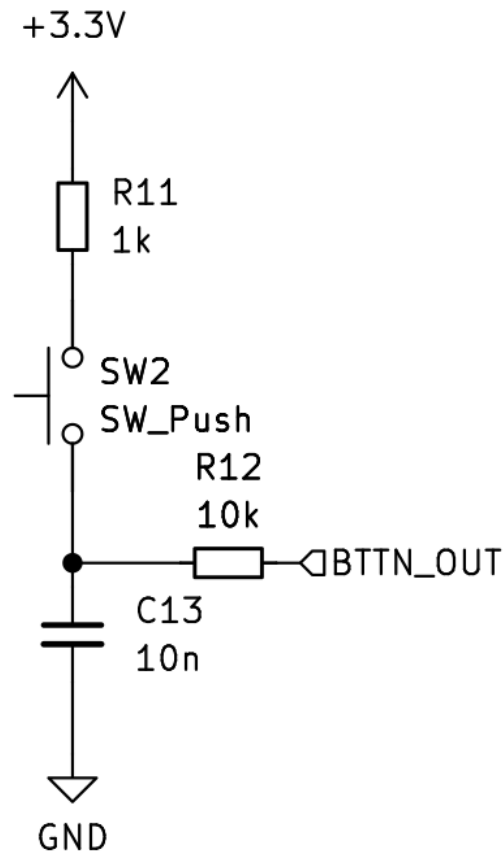
Na slici 4.1 je vidljiva shema pojedinačnog pokazivača.



Sl. 4.1 Shema pojedinačnog 7-segmentnog pokazivača

4.2. Upravljanje mjernim sustavom od strane korisnika

Kako bi se pojednostavio rad korisnika sa mjernim sustavom, dodana su tri gumba. Kako bi se spriječile pogreške unosa uzrokovane mehaničkim istitravanjem kontakata gumba, svaki od gumba ima dodatnu RC mrežu za filtriranje istitravanja. Shema pojedinačnog gumba se nalazi na slici 3.2.



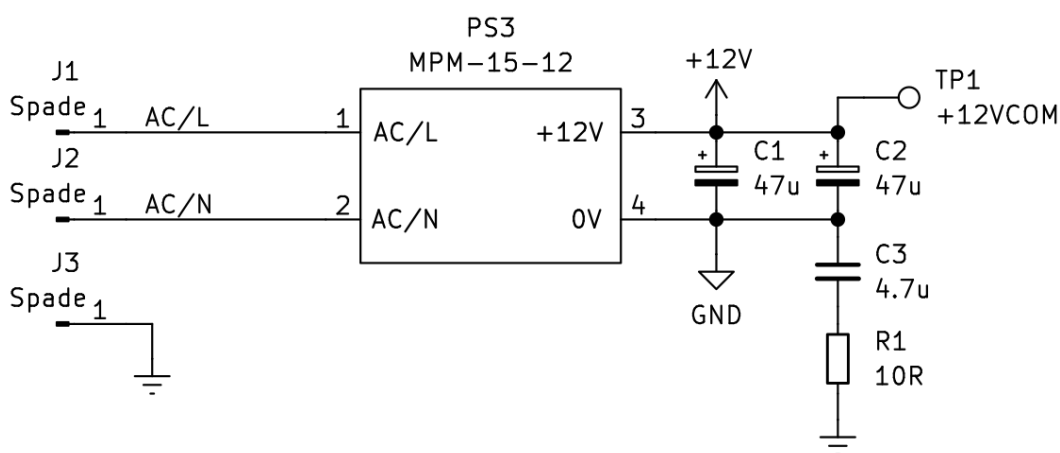
Sl. 3.2 Shema pojedinačnog gumba

5. Napajanje

5.1. Pretvorba sa mrežnog izmjeničnog napona na istosmjerni međunapon

Napajanje za mjerni sustav dolazi iz gradske mreže. Dobra izvedba napajanja ključna je za postizanje male struje curenja kroz mjerni sustav. Kako bi se pojednostavila izrada napajanja, za pretvorbu mrežnog napona u stabilni istosmjerni napon koristi se gotov izvor napajanja. Potrebno je koristiti napajanja koja su napravljena za medicinsku upotrebu, jer ona zahtijevaju također niske struje curenja i velike izolacije kako život pacijenata ne bi bio ugrožen. Procjena potrošnje sklopa je manja od 10 W ali je za zalihost odabrano napajanje od 15 W.

RC mreža sačinjena od C3 i R1 sa slike 5.1 odvodi višak struje curenja prema uzemljenju. U konačnoj izradi rješenja mreža će biti ispitana ako povećava ili smanjuje konačnu struju curenja. Na slici 5.1 vidljiva je shema pretvorbe mrežnog napona na istosmjerni međunapon.



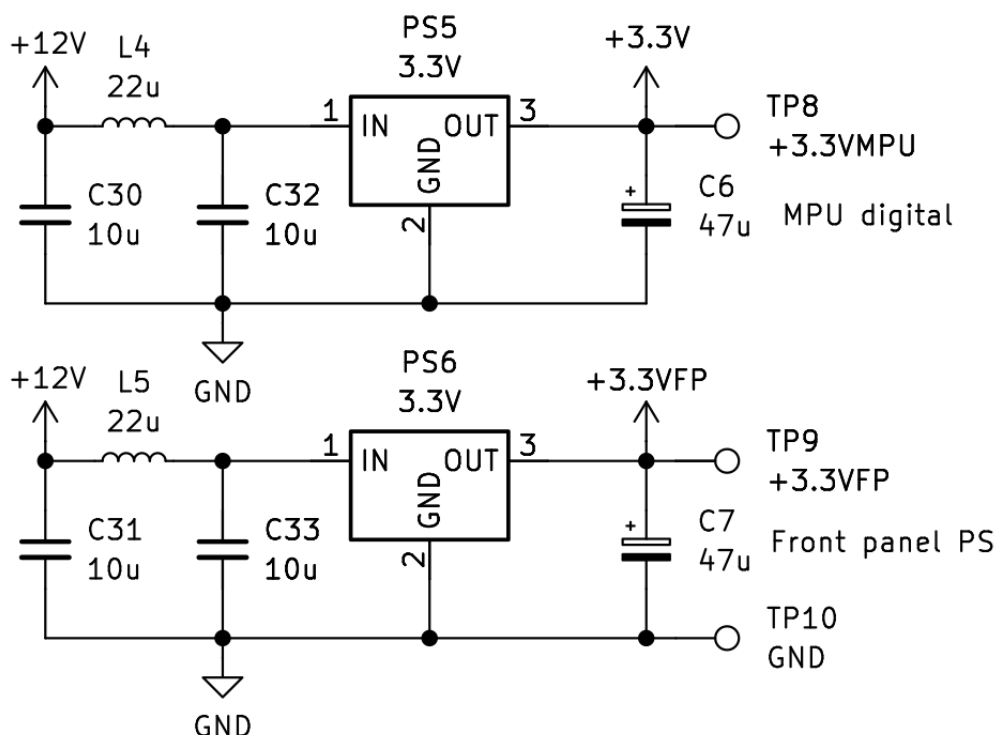
Sl. 5.1 Shema pretvorbe mrežnog napona na istosmjerni međunapon

5.2. Napajanje digitalnog upravljačkog sustava i brojčanog prikaza

Za napajanje digitalnih sustava potrebno je generirati stabilnih 3.3 V. Korištenje linearnih regulatora za generiranje 3.3 V za digitalni upravljački sustav je nepoželjno zbog niske učinkovitosti. Korištenje neizoliranih DC/DC pretvarača znatno smanjuje potrošnju energije.

S obzirom da se na brojčanom prikazu preklapaju veće struje prilikom osvježavanja prikaza, pogodno je odvojiti DC/DC pretvarače za digitalni upravljački sustav i za brojčani prikaz.

DC/DC pretvarači koji se koriste su TR10S3V3, sa izlaznom strujom od 3.3 V. Prethodno navedeni DC/DC pretvarači su pin kompatibilni sa 78xx serijom linearnih regulatora. Svaki DC/DC prema podacima iz tehničkih specifikacija sadrži π filter na ulazu. Na slici 5.2 nalazi se shema naponskih regulatora za napajanje digitalnog upravljačkog sustava i brojčanog prikaza.



Sl. 5.2 Shema naponskih regulatora za napajanje digitalnog upravljačkog sustava i brojčanog prikaza

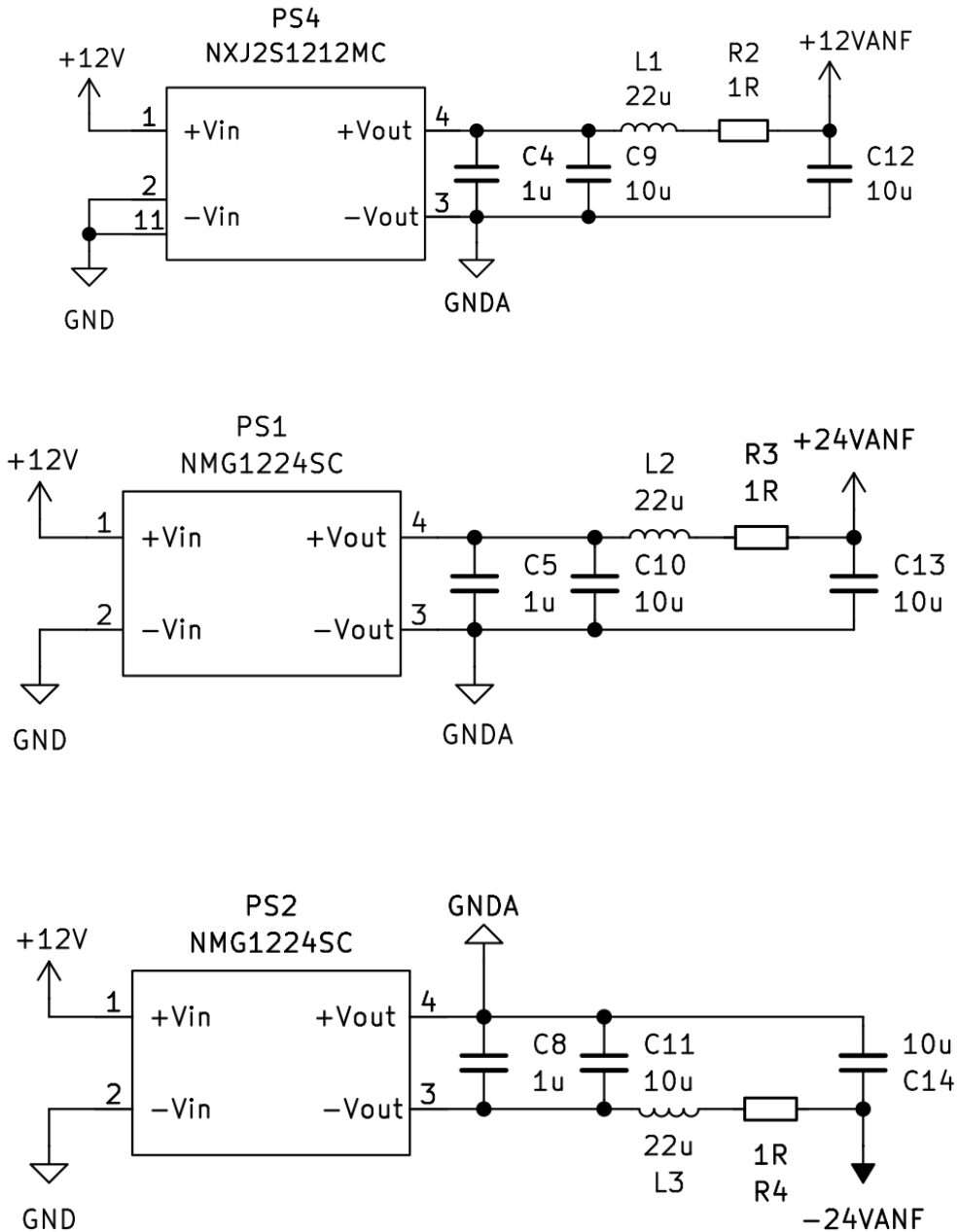
5.3. Napajanje analognog mjernog sustava

Napajanje analognog mjernog sustava mora biti galvanski izolirano od međunapona opisanog u poglavlju 5.1., te je potrebno koristiti izolirajuće DC/DC pretvarače. Slično kao i za glavno napajanje iz u poglavlja 5.1, potrebno je koristiti medicinska napajanja kako bi se maksimalno smanjile struje curenja kroz mjerni sustav.

Za napajanje analognog mjernog sustava potrebno je generirati niz različitih naponskih razina:

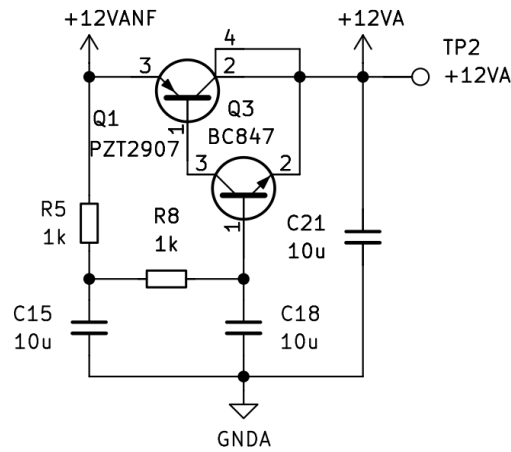
- +15 V
- -15 V
- +24 V
- +3.3 V
- +12 V

Najkompleksniji potrošač na analognom mjernom sustavu je naponska referenca odnosno grijač naponske reference iz poglavlja 2.3. Prilikom paljenja grijač ima potrošnju od 110 mA neovisno o razini napajanja. Nakon što se referenca zagrije, njena potrošnja pada proporcionalno naponu napajanja grijača, oko 0.2 W do 0.3 W u ovisnosti o dizajnu tiskane pločice. Ovakav oblik potrošnje stvara problem jer se pri paljenju mora dati višestruko veća snaga. Primjerice, za napon napajanja grijača od 20 V, početna snaga grijača iznosi 2.2 W, dok se nakon zagrijavanja smanjuje na 0.2 W. snage. Najmanji omjer inicijalne potrošnje i konačne dobije se korištenjem najmanjeg napona napajanja grijača, te je za tu svrhu odabran zasebni izolirajući DC/DC pretvarač sa naponom napajanja od 12 V i snagom od 2 W. Iz tog napajanja se također linearnim regulatorom generira i 3.3 V napajanje za digitalnu stranu analogno digitalnog pretvornika i izolatora. Za potrebe regulatora opisanog u poglavlju 2.6. potrebno je imati razinu od +24 V. Kako bi se postigla bolja simetričnost napajanja, koriste se dodatna dva izolirajuća DC/DC napajanja za generiranje ± 24 V. DC/DC pretvarači na svom izlazu imaju veliku količinu valovitosti napona koje se preslikava na mjerni signal. Shema korištenih DC/DC napajanja za galvansku izolaciju analognog mjernog sustava nalazi se na slici 5.3. Na izlazu svakog od DC/DC napajanja vidljivog na shemi na slici 5.3 nalazi se i LC filter. U seriju sa prethodno navedenim LC filterom dodan je otpornik od 1 Ω kako bi se smanjio Q faktor i potencijalne oscilacije prilikom paljenja sustava.

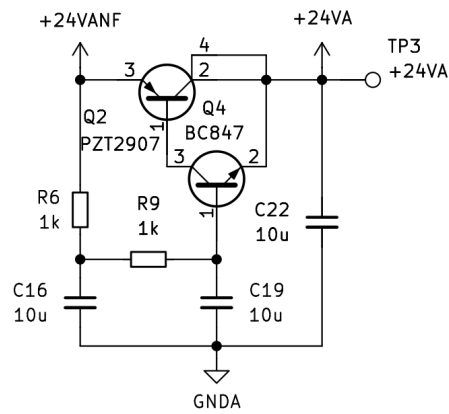


Sl. 5.3 Shema DC/DC napajanja za galvansku izolaciju analognog mjernog sustava

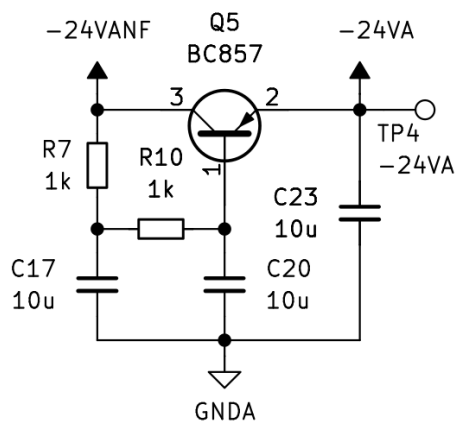
Za dodatno filtriranje, svaki od izlaza DC/DC napajanja prolazi kroz dvostupanjski RC filter i naponsko sljedilo izvedeno sa tranzistorom. Shema dodatnog aktivnog filtriranja napona grijača vidljiva je na slici 5.4. Za dodatno strujno pojačanje naponskog sljedila, koristi se NPN i PNP par tranzistora u sziklai konfiguraciji. Isti oblik filtriranja vidljiv na shemi na slici 5.5 koristi se za +24 V liniju. Filtriranje -24 V linije je skoro identično kao što je vidljivo na slici 5.6, no zbog puno manje potrošnje energije nije potrebno korištenje sziklai konfiguracije tranzistora.



Sl. 5.3 Shema aktivnog filtriranja napona grijača



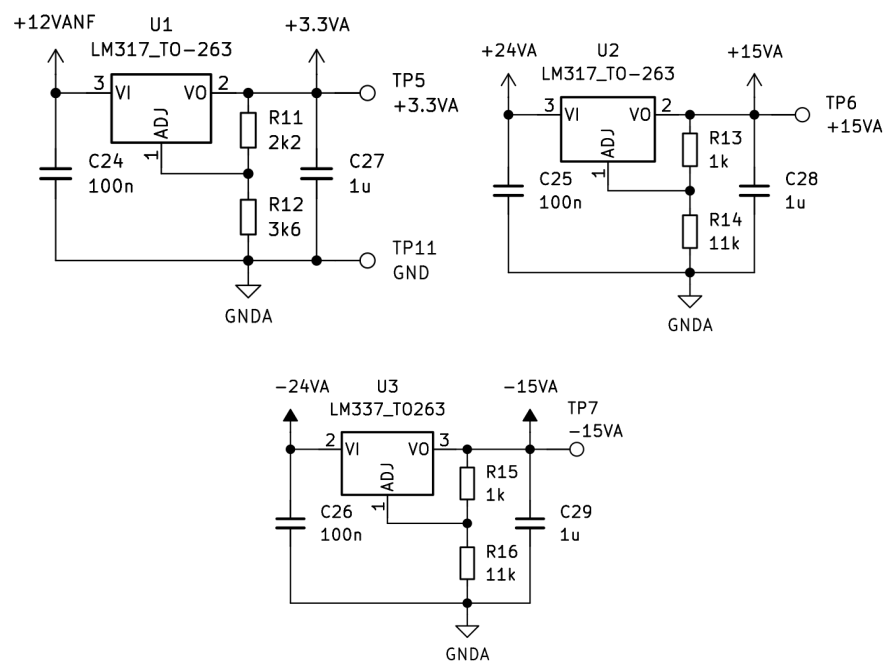
Sl. 5.4 Shema aktivnog filtriranja 24 V linije



Sl 5.6 Shema aktivnog filtriranja -24 V linije

Generiranje ostalih nižih napona izvodi se korištenjem linearnog regulatora LM317, odnosno LM337 za negativne napone. LM317 i LM337 su podesivi linearni regulatori. Izlazni napon podešava se otpornim djelilom prema izrazu (11). Pomoću izraza (11) odabrane su otporničke mreže za generiranje preostalih napona napajanja. Na slici 5.7 vidljiva je konačna shema generiranje +3.3 V, +15 V i -15 V.

$U = 1.25 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) + R_2 \times 50 \mu A$	(11)
---	------



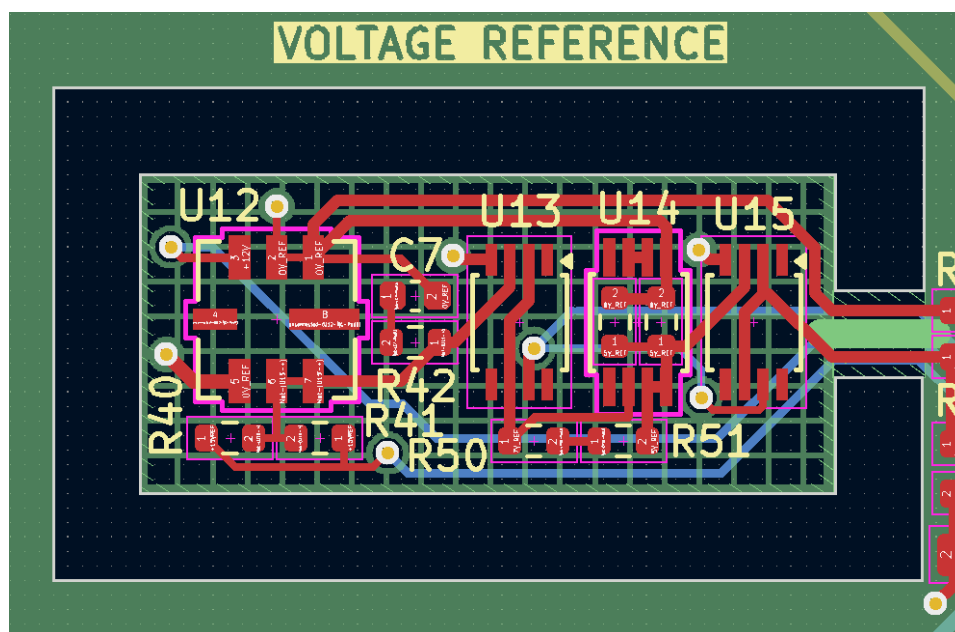
Sl. 5.7 Shema linearnih regulatora za generiranje +3.3 V, +15 V i -15 V

6. Izvedba tiskanih pločica

6.1. Analogni mjerni sustav

Analogni mjerni sustav realiziran je na četveroslojnoj tiskanoj pločici, gdje se gornji unutarnji sloj koristi za 0 V referentni potencijal. Ispuna cijelog unutarnjeg sloja također pomaže kod ravnomjerne raspodjele temperaturnih gradijenata i povećanja termalnog kapaciteta pločice kako bi sustav bio otporniji na kratkotrajne promjene temperature. Pasivne komponente koji se koriste na ovoj pločici su u 0603 kućištu, jer imaju manji termalni kapacitet i kako bi mjerni sustav mogao prije doseći očekivanu točnost.

Na slici 6.1 nalazi se izvedba naponske reference. Crvenom bojom označen je gornji sloj, zelenom gornji unutarnji sloj, narančastom donji unutarnji sloj te plavom bojom donji sloj.

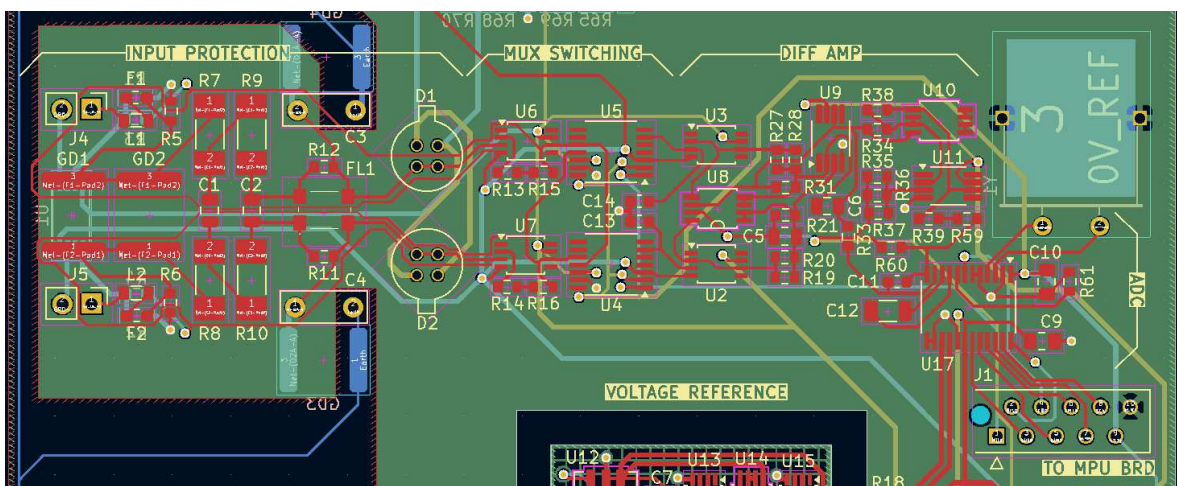


Sl. 6.1 Izvedba naponske reference na tiskanoj pločici

Naponska referenca generira veliku količinu topline (unutarnji grijač podešen je na održavanje 90°C unutarnje temperature) te kako bi se ubrzao postupak grijanja reference je potrebno smanjiti ispunu slojeva u svrhu povećanja termalnog otpora prema ostatku pločice. Referencu je potrebno i odvojiti sa tri strane tiskane pločice kako fizička naprezanja tiskane pločice ne bi utjecala na napon reference i stabilnost. Vodovi koji vode 0 V i 7.05 V potencijal iz reference prema analogno digitalnom pretvorniku kreću se paralelno kako bi se smanjio utjecaj temperaturnih gradijenata. Temperaturni gradijent koji

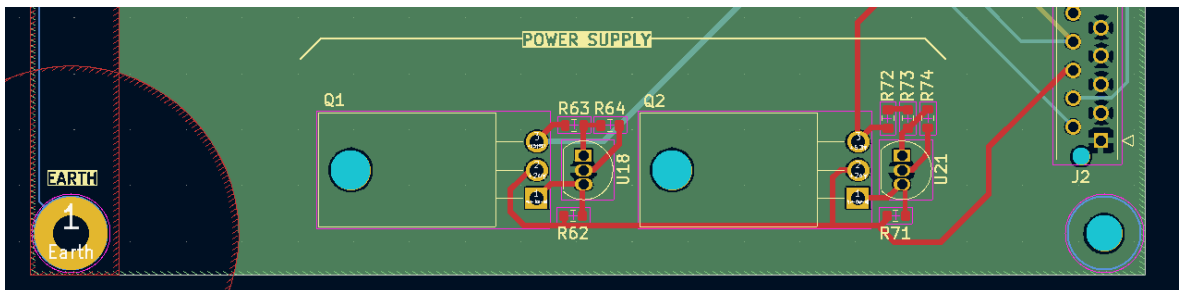
će se nalaziti na odvojenom dijelu pločice za naponsku referencu je takav da će lijeva strana odvojenog dijela pločice će biti toplija od desnog jer ostale komponente ne generiraju toliku količinu temperature). Ni jedan od prethodno navedena dva potencijala ne mijenja sloj kako bi se izbjegao utjecaj temperaturnih gradijenata po debljini tiskane pločice. Na istom odvoju pločice se nalazi i otpornička mreža za podešenje napona reference analognog digitalnog pretvornika.

Na slici 6.2 vidljiva je izvedba ulazne zaštite i filtera, sklopa za poništavanje termonapona, ulaznog diferencijalnog pojačala te analognog digitalnog pretvornika, navedenim redosljedom s lijeva na desno. Diferencijalni par vodova je vođen simetrično i isključivo gornjim slojem kako se minimizirao utjecaj temperaturnih gradijenata. Na viskoimpedancijskom dijelu, signalni vodovi su zaštićeni zaštitnim vodom protiv površinskih struja curenja. Kućište kvarcnog kristala za analognog digitalni pretvornik namijenjeno je lemljenju za tiskanu pločicu kako bi se minimizirali utjecaji vibracije na frekvencijsku stabilnost i pretvorbu unutar analognog digitalnog pretvornika.



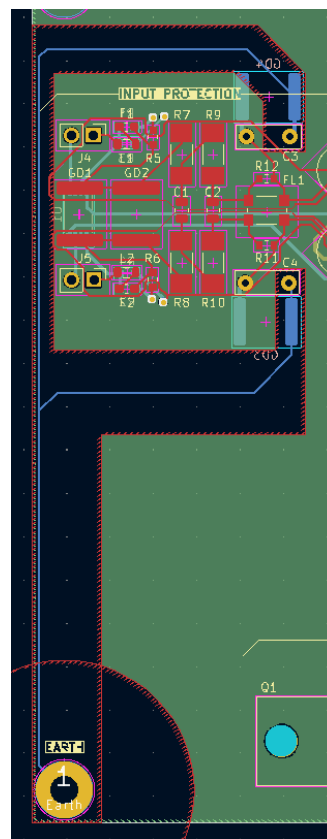
Sl. 6.2 Izvedba analognog mjernog lanca na tiskanoj pločici

Dodatno napajanje sklopa sačinjeno od sklopova opisanih u poglavljima 2.6. i 2.7. nalaze na donjem najudaljenijem dijelu pločice kako bi zagrijavanje tranzistora prilikom regulacije maksimalno udaljilo od mjernog lanca sustava vidljivog na slici 6.2. Izvedba dodatnog napajanja vidljivo je na slici 6.3.



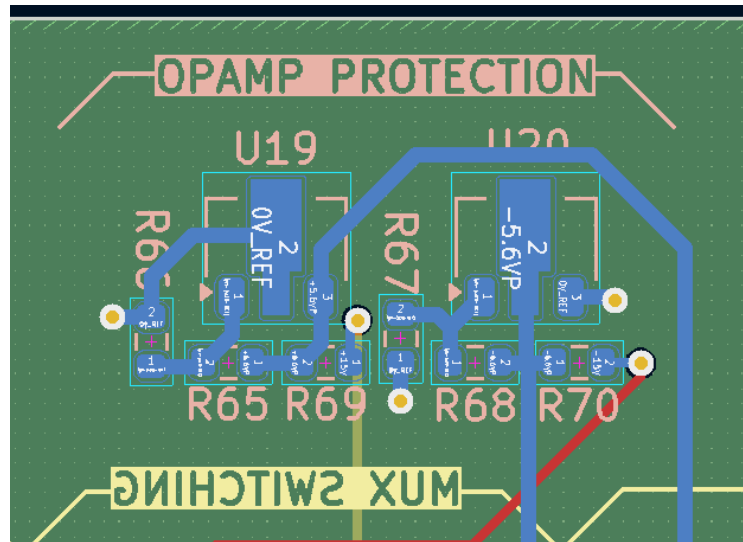
Sl. 6.3 Izvedba dodatnog napajanja za analogni mjerni sustav

Spoj prema uzemljenju koji je potreban za filtre je bitno maksimalno izolirati od ostataka pločice kako bi se povećala izolacija i smanjile potencijalne struje curenja. Za tu svrhu dodane su dvije zone s pravilima za blokiranje ispune vidljive na slici 6.4. Spoj prema uzemljenju vrši se preko mehaničkog spoja koji ujedno služi i za montiranje pločice za kućište.

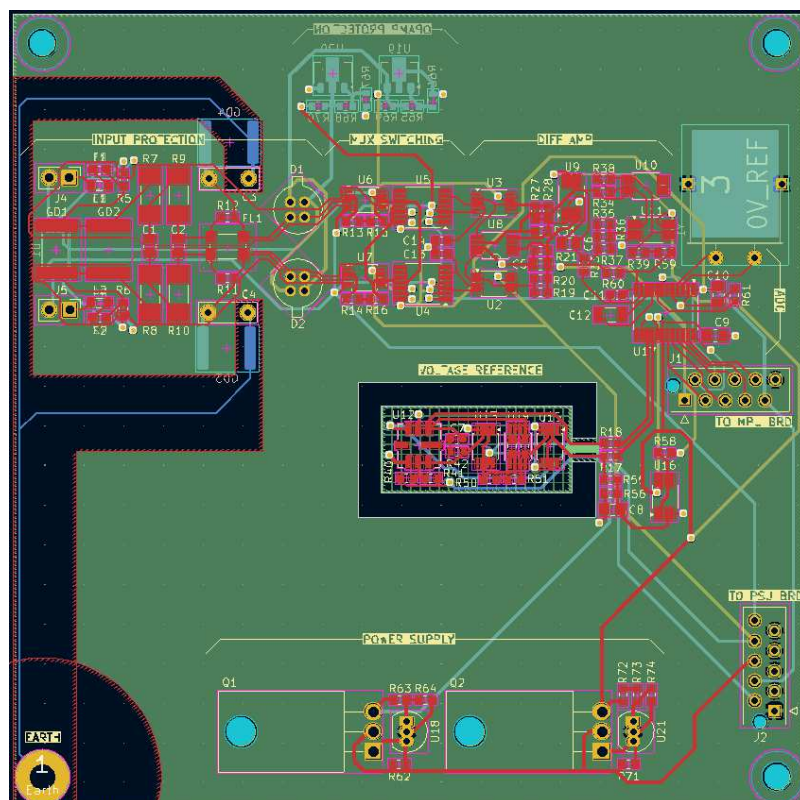


Sl. 6.3 Izvedba spoja prema uzemljenju

Izvor zaštitnih napona nalazi se sa donje strane pločice kako bi se potencijalno zagrijavanje uslijed prolongirane zaštite moglo maksimalno raspodijeliti po gornjem unutarnjem sloju. Izvedba izvora zaštitnih napona vidljiva je na slici 6.4. Cjelokupna izvedba analognog mjernog sustava vidljiva je na slici 6.5.



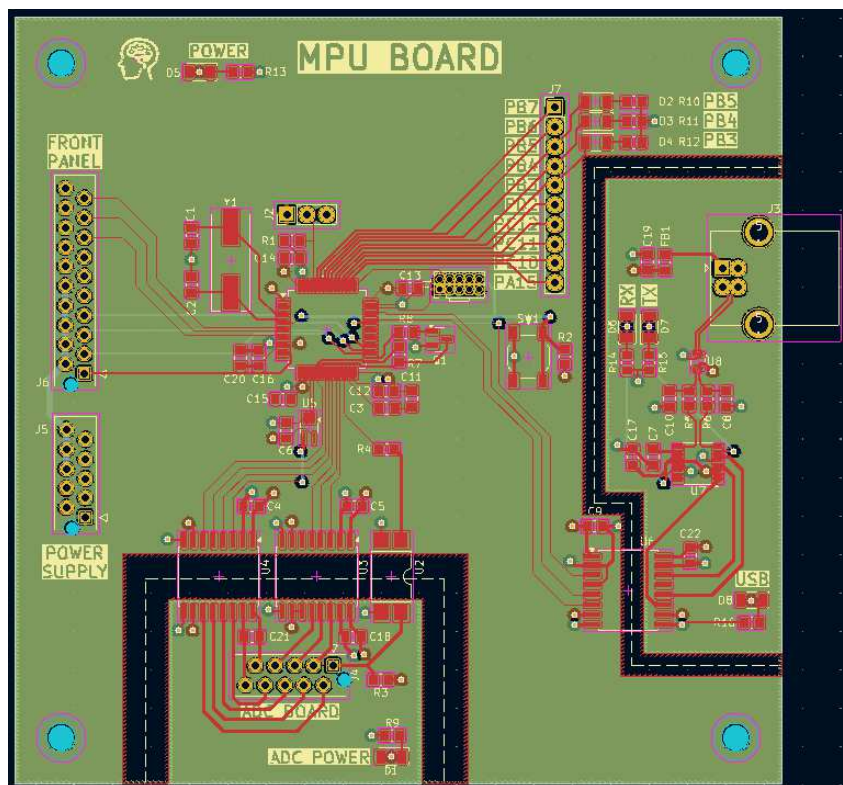
Sl. 6.4 Izvedba izvora zaštitnih napona



Sl. 6.5 Cjelokupna izvedba analognog mjernog sustava

6.2. Digitalni upravljački sustav

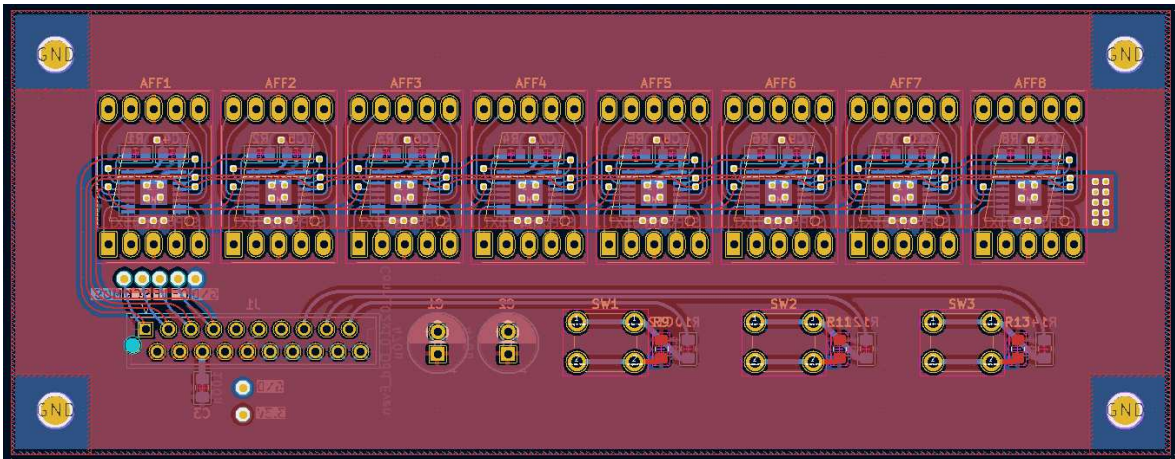
Digitalni upravljački sustav realiziran je na četveroslojnoj tiskanoj pločici. Unutarnja dva sloja služe za provođenje napajanja. Izvedba na četveroslojnoj pločici omogućuje manje elektromagnetske smetnje uzrokovane prekidačkim načinom rada mikrokontrolera. Digitalni upravljački sustav na sebi sadrži tri galvanski izolirana sklopa te je bio potrebno obratiti pažnju da je izolacija prisutna na sva četiri sloja. Digitalni upravljački sustav na sebi sadrži i izvedene kontakte od nekorištenih pinova na mikrokontroleru za pomoć u otklanjanju nepredviđenih grešaka i pomoć u razvoju programske podrške. Vodove kojima prolazi USB komunikacija bilo je potrebno realizirati diferencijalnu impedanciju od 90Ω . Na slici 6.6 vidljiva je izvedba digitalnog upravljačkog sustava. Galvanski izolirani spoj prema analognom mjernom sustavu se nalazi na donjem dijelu pločice, dok galvanski izolirana izvedba USB komunikacije se nalazi na desnom dijelu pločice.



Sl. 6.6 Izvedba digitalnog upravljačkog sustava

6.3. Brojčani prikaz

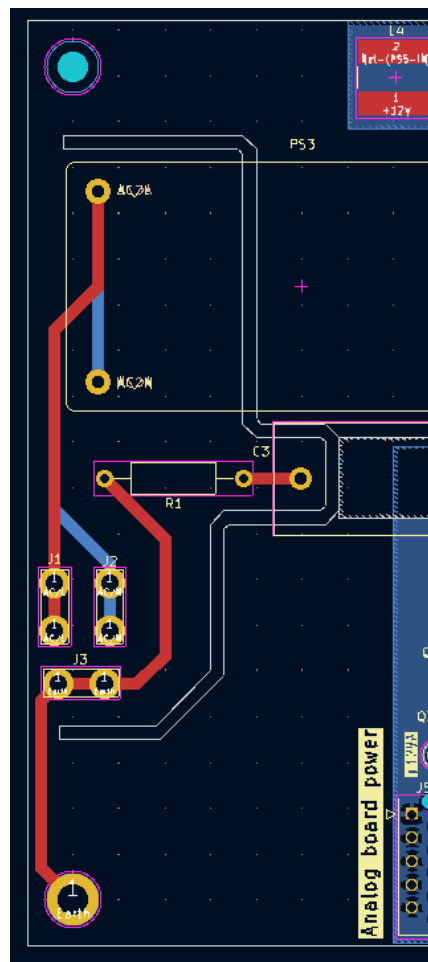
Brojčani prikaz realiziran je na dvoslojnoj tiskanoj pločici. Na gornjoj strani se nalaze pojedinačni 7-segmentni pokazivači i gumbi za upravljanje mjernim sustavom. Ispod svakog 7-segmentnog pokazivača se nalazi pripadni integrirani sklop za pogon. Na slici 6.7 vidljiva je izvedba brojčanog prikaza.



Sl. 6.7 Izvedba brojčanog prikaza

6.4. Napajanje

Napajanje za mjerni sustav izvedeno je na dvoslojnoj pločici. Kod napajanja je potrebno najviše obratiti pažnju na izolaciju, kako bi se izolirao visoki napon mreže od niskog napona mjernog sustava, te kako bi se maksimalno smanjile struje curenja iz mrežnog napona. Dodatna izolacija postignuta je koristeći proreze u tiskanoj pločici te je dodan prorez između primara i sekundara napajanja. Razmak između vodova faze, nule i uzemljenja je redundantno povećana na 2.5mm. Izvedba dijela primara napajanja vidljiva je na slici 6.8.



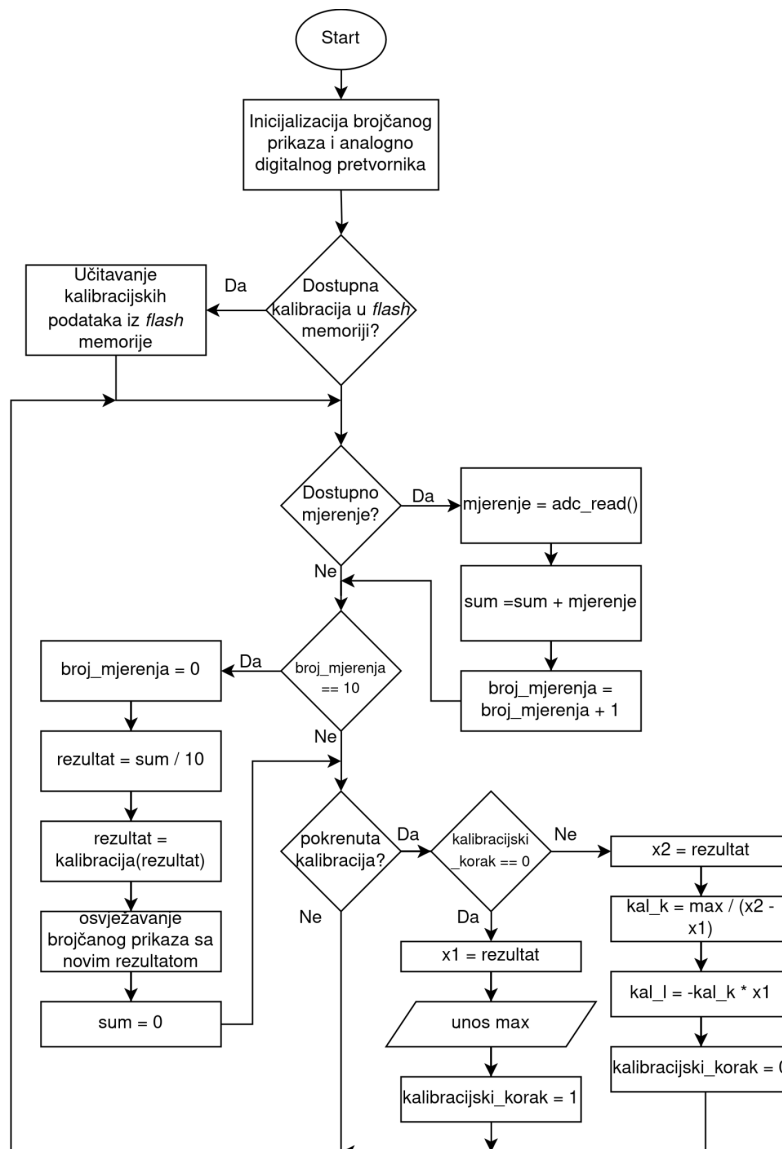
Sl. 6.8 Izvedba primara napajanja

Strana sekundara dijeli se na dva galvanski izolirana dijela, napajanje digitalnog upravljačkog sustava i analognog mjernog sustava. Napajanje za digitalni upravljački sustav i broječni prikaz. DC/DC regulatori se nalaze na gornjoj strani pločice, kako bi maksimalno bili udaljeni od napajanja analognog mjernog sustava i minimizirali utjecaj elektromagnetskih smetnji koje prekidačka napajanja stvaraju. Kako bi se osigurao najbolji

7. Algoritam digitalnog upravljačkog sustava

7.1. Opis osnovnog rada digitalnog upravljačkog sustava

Osnovni zadatak digitalnog upravljačkog sustava je kontinuirano mjerenje i prikaz mjernih rezultata na brojčanom prikazu sa brzinom osvježavanja od 1 s. Za dodatno upravljanje i umjeravanje mjernog sustava, digitalni upravljački sustav pruža i komunikaciju preko serijskog *terminala*. Komunikacija preko terminala ne smije zaustaviti mjerenje, osim u slučaju umjeravanja i upisivanja mjerne kalibracije u trajnu memoriju. Na slici 7.1 vidljiv je dijagram toka osnovnog algoritma koji digitalni upravljački sustav izvršava.



Sl. 7.1 Dijagram toka osnovnog algoritma digitalnog upravljačkog sustava

7.2. Umjeravanje mjernog sustava

Mjerni sustav se umjerava u minimumu i maksimumu mjernog područja. Minimum mjernog područja postiže se tako da se kratkom žicom prespoje ulazni kontakti. Maksimum mjernog područja postiže se spajanjem stabilnog naponskog izvora od približno 10 V, te upisivanjem točnog napona koji je paralelno izmjeren voltmetrom veće preciznosti i točnosti od 0.001%. Korekcijska krivulja korištena za umjeravanje je pravac. Izračun točne vrijednosti vidljiv je izrazom (12), gdje je x direktna vrijednost očitana sa analogno digitalnog pretvornika i gdje su “ k ” i “ l ” korekcijski parametri. Algoritam proračuna “ k ” i “ l ” parametara se može vidjeti na slici 7.1. Na slici 7.2 vidljiv je primjer komunikacije preko serijskog *terminala* potreban za umjeravanje mjernog sustava.

$f(x) = k \times x + l$	(12)
-------------------------	------



```
/dev/ttyUSB0 - PuTTY
High precision voltmeter
(C)Nikola Kauzljjar
V1.0
ADC initialized
Loading calibration
>calibrate -r -0.19000
>Null point captured
Enter end value:
10.00678
> 9.23218
```

Sl. 7.2 Umjeravanje mjernog sustava preko serijskog *terminala*

8. Mehanička izvedba mjernog sustava

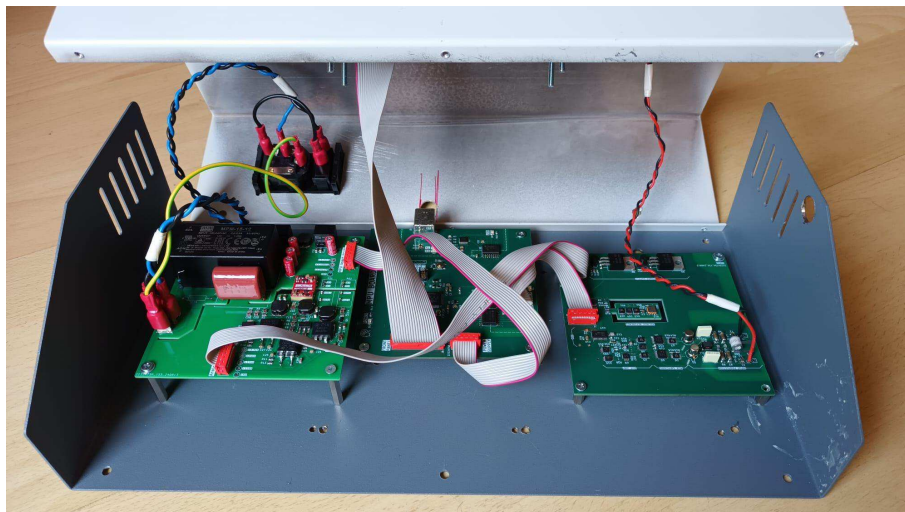
8.1. Kućište i ožičenje

Kako bi se minimizirao utjecaj vanjskih elektromagnetskih smetnji, mjerni sustav potrebno je oklopiti sa uzemljenim metalnim kućište. Na slici 8.1 vidljiv je mjerni sustav u sklopljenom kućištu.



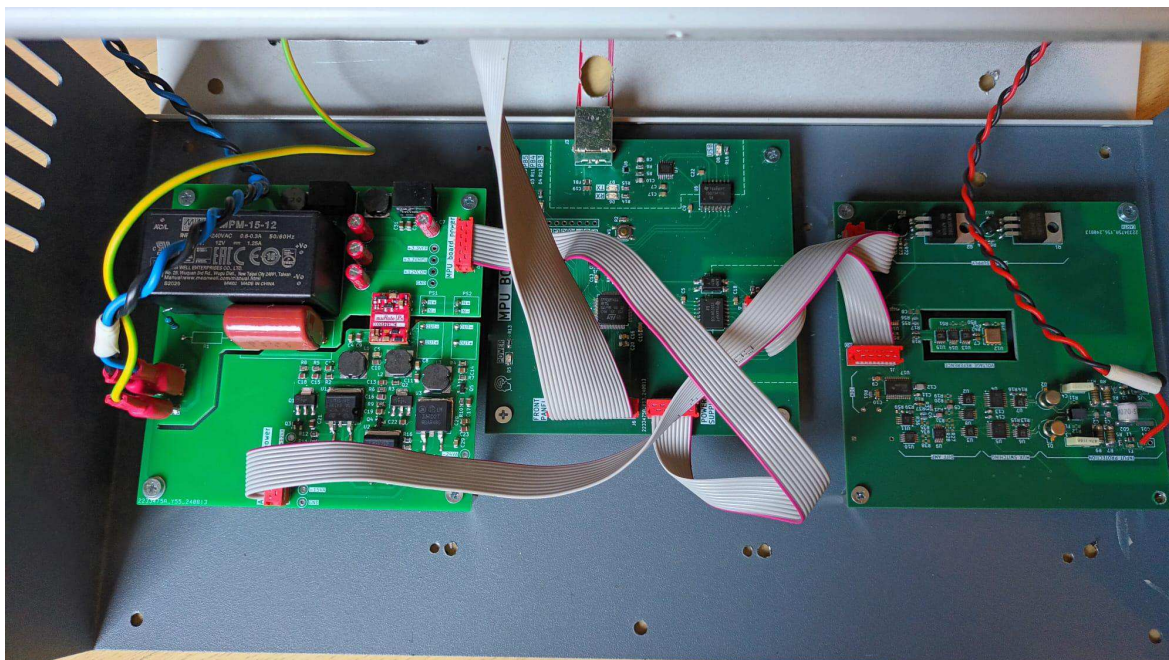
Sl. 8.1 Mjerni sustav u sklopljenom kućištu

Spajanje modula napajanja na IEC konektor za napajanje gradske mreže napravljeno je parom žica koje imaju dovoljno visoku izolaciju za gradski napon, te su upletene kako bi se smanjile elektromagnetske smetnje. Spoj od mjernih konektora prema analognom mjernom sustavu učinjen je neoklopljenim parom upletenih žica. Ožičenje od pločica prema konektorima na kućištu vidljivo je na slici 8.2.



Sl. 8.2 Unutarnje ožičenje mjernog sustava

Međuspojevi između pojedinačnih modula izveden je preko višezilnih *flat* kablova koji su vidljivi na slici 8.3. Na slici 8.3 s lijeva na desno su vidljivi moduli: napajanje, digitalni upravljački sustav te analogni mjerni sustav. Konektor za USB je zalemljen direktno za pločicu digitalnog upravljačkog sustava te je za njega izbušena zaseban otvor na kućištu.



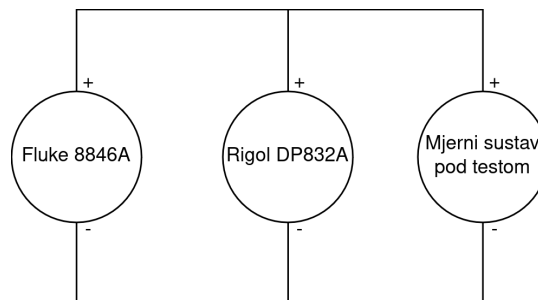
Sl. 8.3 Ožičenje između pojedinačnih pločica

9. Mjerenja točnosti sustava

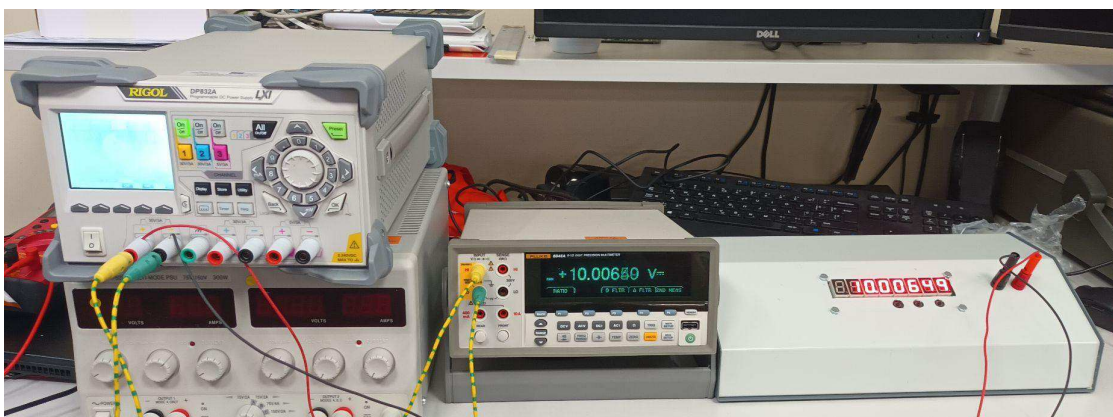
9.1. Korišteni mjerni uređaji i mjerna postava

Za potrebe generiranja stabilnog napona koristi se linearno napajanje sa digitalnim podešavanjem izlaznog napona Rigol DP832A. Jako je bitno koristiti linearno napajanje, kako valovitost napona ne bi izazivala nesigurnost i lošu ponovljivost mjerenja. Također, linearna napajanja sa pasivnim potencimetrima za podešavanje napona imaju preveliki vremenski drift u naponu za točnost koju ovaj mjerni sustav traži.

Referentni voltmetar koji je korišten je 6.5 znamenkasti stolni multimeter Fluke 8846A. Referentni multimeter je podešen na mjerenje istosmjernog napona na mjernom opsegu od 10 V i integracijskom vremenu od 100 vremenskih ciklusa gradske mreže, odnosno 2 s. Za mjerenje struje curenja korišten je ručni multimeter Fluke 289. Svi uređaji su bili upaljeni i pušteni da se zagriju minimalno 90 minuta prije umjeravanja i mjerenja. Na slici 9.1 vidljiva je shema mjernog spoja. Na slici 9.2 vidljiva je mjerna postava.



Sl. 9.1 Shema mjernog spoja



Sl. 9.2 Mjerna postava

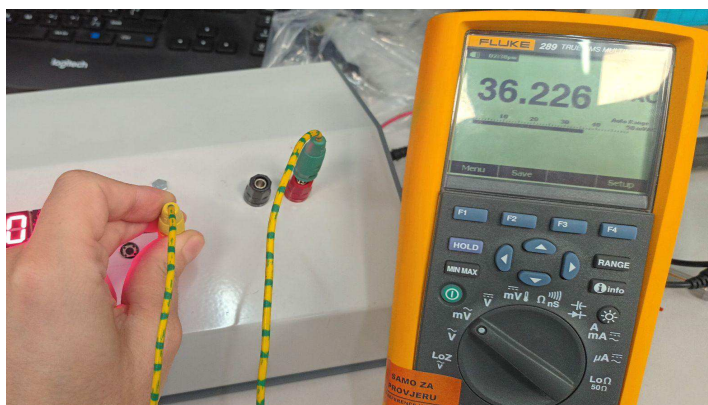
9.2. Ispitivanje sklopa za poništavanje termonapona

Prilikom ispitivanja mjerenja korištenjem preklapanja sklopa opisanog u poglavlju 2.4. utvrđene su velike greške u mjerenju te velika mjerna neponovljivost. Iako analogni mjerni sustav do analogno digitalnog pretvornika ima dovoljno brzi odziv na skokovitu pobudu, analogno digitalni pretvornik nema dovoljno brzi odziv. Za sva mjerenja sklop za poništavanje termonapona je isključen. Potencijalni način kako bi se ovaj sklop mogao unaprijediti je da se doda još jedan par multipleksera pred same ulaze analogno digitalnog pretvornika, kako se na samom ulazu pretvornika ne bi odvijala skokovita pobuda. Unatoč tome što se ne koristi kompenzacija termonapona, mjerni sustav zadovoljava zadanu točnost opisanu u poglavlju 9.4.

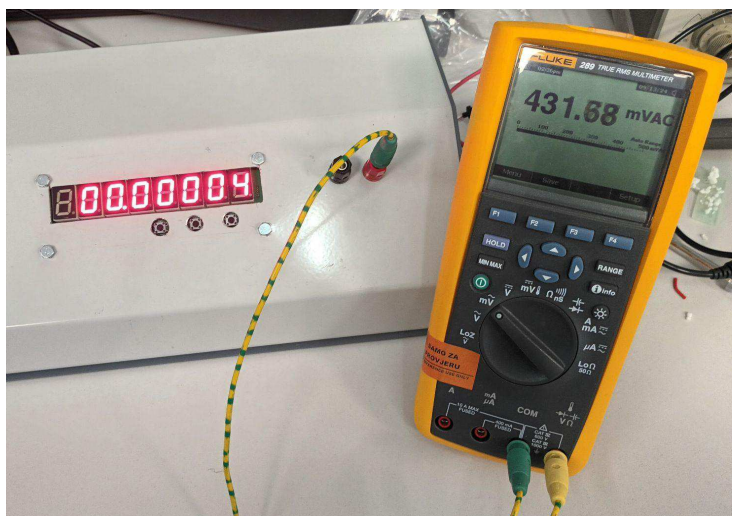
9.3. Mjerenje struja curenja

Struje curenja mjerene su ručnim multimetrom Fluke 289 kako bi se otklonila greška nastala strujama curenja mjernog instrumenta. Mjerni opseg za mjerenje izmjenične struje na prethodno navedenom instrumentu nije dovoljno osjetljiv, te je stoga korišten mjerni opseg za mjerenje izmjeničnog napona, gdje je poznata ulazna impedancija od $10\text{ M}\Omega$, odnosno mjerena struja je $0.1\ \mu\text{A}$ po 1 V . Struje curenja su mjerene sa spojenom te sa odspojenom RC mrežom opisanom u poglavlju 5.1. Mjerenje je pokazalo da je struja curenja veća ako se koristi RC mreža.

Mjerenje struje curenja od mjernih kontakata mjernog sustava prema uzemljenju vidljivo je na slici 9.3 te iznosi 3.2 nA . Mjerenje struje curenja od izvora napajanja prema mjernim kontaktima vidljivo je na slici 9.4 te iznosi 42.2 nA . Izmjerene struje curenja su iznimno malene, te je moguće zaključiti da neće unositi nepotrebne greške.



Sl 9.3 Mjerenje struje curenja od mjernih kontakata prema uzemljenju



Sl 9.4 Mjerenje struje curenja od izvora napajanja prema mjernim kontaktima

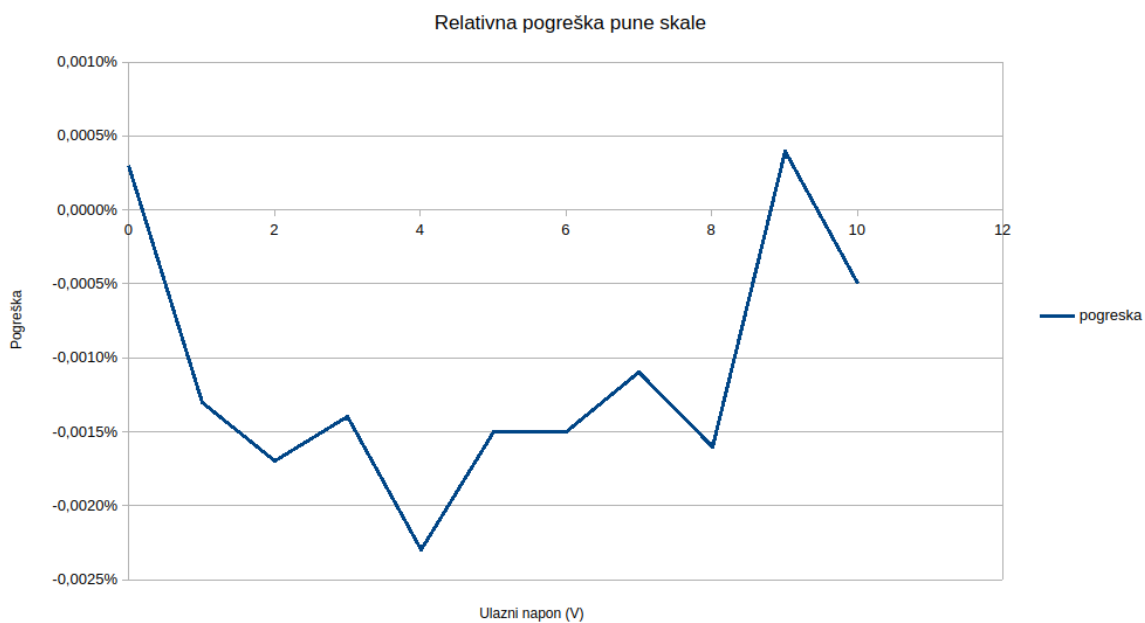
9.4. Mjerenje točnosti mjernog sustava

Točnost mjernog sustava mjerena je u 11 točaka, od 0 V do 10 V sa koracima od 1 V. Mjerenje u svakoj točki napravljeno je 5 puta, te je uzeto u obzir mjerenje sa najvećim odstupanjem. U tablici 9.1 vidljivi su rezultati mjerenja točnosti.

Tablica 9.1 Maksimalna odstupanja točnosti po mjernim točkama

Mjerna točka	Točan napon (V)	Mjereni napon (V)	Relativna pogreška pune skale
1	0	0,00003	0,0003%
2	1,00577	1,00564	-0,0013%
3	2,00622	2,00605	-0,0017%
4	3,00561	3,00547	-0,0014%
5	4,00602	4,00579	-0,0023%
6	5,00629	5,00614	-0,0015%
7	6,00573	6,00558	-0,0015%
8	7,00505	7,00494	-0,0011%
9	8,00689	8,00673	-0,0016%
10	9,00600	9,00604	0,0004%
11	10,00631	10,00626	-0,0005%

Iz tablice 9.1 vidljivo je maksimalno apsolutno relativno odstupanje od pune skale u iznosu od 0.0023%. Rezultati mjerenja točnosti pokazuju da mjerni sustav zadovoljava zahtjev točnosti od 0.05%. Na slici 9.5 vidljiv je graf odstupanja u ovisnosti o mjerenom naponu.



SI 9.5 Graf odstupanja u ovisnosti o mjerenom naponu

Zaključak

Realiziran je mjerni sustav za precizno mjerenje napona. Primarni cilj je bio postići zadanu točnost od 0.05% sa korištenjem minimalne programske podrške, odnosno realizirati analogni mjerni sustav sa odgovarajuće niskim šumom te temperaturnom i vremenskom stabilnošću. Realizirani mjerni sustav nadmašio je zadanu točnost za više od 20 puta. Dodatna poboljšanja bi se mogla postići uz kompleksnije oblike umjeravanja u programskoj podršci te koristeći precizniji naponski generator (sa namjenom za umjeravanje mjernih instrumenata) i precizniji referentni voltmetar. Ponovnom analizom analognog mjernog lanca, kao najslabijom karikom pokazao se analogno digitalni pretvornik, odnosno integralna nelinearnost pretvornika koja unosi najveću pogrešku u mjerenju. Iako su korištene komponente koje imaju višestruko bolje karakteristike nego li je potrebno da bi se realizirao zadani sustav, korištenje komponenti sa slabijim karakteristikama ne bi znatno smanjile ukupnu cijenu mjernog sustava.

Jednako veliku pozornost kao i prema izboru komponenti bilo je potrebno usmjeriti prema fizičkoj realizaciji i prema fizikalnim efektima koji se događaju na realiziranoj elektronici kao što su širenje temperaturnih gradijenata, otpornost kućišta komponenti na vlagu i fizička rastezanja.

Literatura

- [1] Texas Instruments, ADS123x 2- and 4-Channel, 24-Bit, Delta-Sigma ADCs for Bridge Sensors, (Siječanj 2021)
- [2] Texas Instruments, OPAx388 Precision, Zero-Drift, Zero-Crossover, True Rail-to-Rail, Input/Output Operational Amplifiers, (Srpanj 2020)
- [3] Analog Devices, ADR1399 Oven-Compensated, Buried Zener, 7.05 V Voltage Reference, (Ožujak 2022)
- [4] Mitchell Lee, AN-82: Understanding and Applying Voltage References, (Studeni 1999)
- [5] Analog Devices, ADG1204, Low Capacitance, Low Charge Injection, ± 15 V/+12 V, 4:1 iCMOS Multiplexer, (Ožujak 2016)
- [6] Linear Systems, DPAD Series, MONOLITHIC DUAL PICO AMPERE DIODES, (Ožujak 2020)
- [7] Analog Devices, ADA4522-1/ADA4522-2/ADA4522-4 55 V, EMI Enhanced, Zero Drift, Ultralow Noise, Rail-to-Rail Output Operational Amplifiers, (Veljača 2022)
- [8] Texas Instruments, TL431, TL432 Precision Programmable Reference, (Svibanj 2024)
- [9] ST, Arm® Cortex® -M4 32b MCU+FPU, 125 DMIPS, 512KB Flash, 128KB RAM, USB OTG FS, 11 TIMs, 1 ADC, 13 comm. interfaces, (Siječanj 2024)
- [10] FTDI, FT230X USB TO BASIC UART IC, (Svibanj 2024)
- [11] Texas Instruments, ISO674x General-Purpose Reinforced Quad-Channel Digital Isolators with Robust EMC, (Veljača 2023)
- [12] Texas Instruments, LM317 3-Terminal Adjustable Regulator, (Travanj 2020)
- [13] ST, STP08CP05 Low voltage, low current power 8-bit shift register, (Kolovoz 2018)

Sažetak

Precizni sustav za mjerenje napona niske frekvencije

Realiziran je mjerni sustav sa ciljanom točnošću od 0.05%, mjernim opsegom od 0 V do 10 V, temperaturnim opsegom od 15°C do 30°C, maksimalnom frekvencijom mjerenja od 0.5 Hz sa odgovarajućom zaštitom mjernog sklopovlja od prenapona i reverznih napona te sa odgovarajućom programskom podrškom za umjeravanje i digitalni prikaz podataka. Izrađene su sheme, izabrane komponente koje najbolje odgovaraju zahtjevima bez prevelikog utjecaja na povećanje cijene, izrađene su tiskane pločice i složene u mehaničko kućište sa pažnjom prema fizikalnim efektima koji mogu negativno utjecati na mjernu točnost uređaja.

Odrađena su mjerenja s kojima je potvrđeno ispunjavanje zadanih zahtjeva.

Ključne riječi: mjerni sustav, voltmetar, temperaturni utjecaji, prenaponska zaštita, filtriranje, niska frekvencija

Summary

A precise system for low frequency voltage measurement

A low frequency voltage measurement system was designed. System specifies target accuracy of 0.05%, measuring scope of 0 V to 10 V, temperature scope of 15°C to 30°C, maximum measurement frequency of 0.5 Hz with appropriate measurement input protection from overvoltage and reverse voltage, with appropriate software support for calibration and digital data display. Schematics were designed, appropriate component were selected, without drastically increasing the price, PCBs were designed and were assembled into a mechanical housing with focus on physical effects that can adversely affect the measuring accuracy of the device.

Measurements have been made with which the system specifications have been confirmed.

Key words: measurement system, voltmeter, temperature effects, overvoltage protection, filtering, low frequency