

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Jernej Škvarč

**PEDAGOŠKI SISTEM ZA MERJENJE KARAKTERISTIK
POLPREVODNIŠKIH ELEMENTOV**

DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec

Ljubljana, junij 2008

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu, univ. dipl. inž. el., za idejo, vso podporo, strokovne nasvete in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela ter konstruiranju vezja. Prav tako se zahvaljujem svojim staršem za vso podporo v času študija in nastajanja diplome ter vsem, ki so mi pri delu kakorkoli pomagali s koristnimi nasveti.

Povzetek

Pri pedagoškem delu, predvsem na področju poučevanja osnovnih znanj elektronike in polprevodniških elementov, se pogosto pojavi potreba po avtomatskem merilnem sistemu za hitro in pregledno merjenje karakteristik polprevodniških elementov.

Merilni sistem mora biti enostavno programsko razširljiv, da omogoča izvedbo različnih demonstracijskih eksperimentov. Njegovi želeni lastnosti sta nizka cena in enostavnost uporabe. Ker je potrebno rezultate eksperimenta običajno prikazati večjemu številu ljudi, je nujna povezava z osebnim računalnikom in s tem možnost nazornega prikaza izmerjenih rezultatov.

Cilj tega diplomskega dela je bil izdelava merilnega sistema, ki bi zadostil vsem prej naštetim pogojem. To nam je uspelo s pomočjo eProDas sistema zajemanja podatkov, ki smo ga uporabili kot vmesni člen med analognim merilnim vezjem in osebnim računalnikom. USB povezava med merilnim sistemom in osebnim računalnikom, ki jo eProDas uporablja, nam omogoča enostavno priključevanje in prenosljivost merilnega sistema.

Izdelani merilni sistem je uporaben tudi v laboratoriju, predvsem na račun velike prilagodljivosti in zadostne natančnosti merjenja. Njegovo uporabnost smo dodatno razširili s funkcijo avtomatskega prepoznavanja tipa merjenega polprevodniškega elementa in razporeda njegovih priključnih sponk. Željeno natančnost merilnega sistema in prijaznost do uporabnika smo zagotovili s funkcijo samodejne kalibracije.

Ključne besede: merilni sistem, eProDas, samodejna kalibracija, identifikacija elektronskih elementov, USB, merjenje karakteristik polprevodnikov.

Abstract

During pedagogical classes, especially when teaching basics of electronics and semiconductor devices, teacher needs an automatic measurement system, capable of quick and didactically biased semiconductor device characteristics measurements.

A suitable measurement system must be easily software expandable so that it can be used for various experiment demonstrations. It should be affordable and easy to handle with. Connection with personal computer is required, since results of experiments need to be clearly presented to a broader audience,

The goal of our work is design of such a system. It was achieved by utilizing eProDas data acquisition system, which plays a role of interface between analog measurement circuitry and personal computer. USB connection, provided by eProDas system, ensures easy connectivity and portability of designed system.

The described system is also a valuable piece of electronics laboratory equipment, especially due to its flexibility and appropriate measurement accuracy. Its usability was further expanded by automatic semiconductor device type and pin connection detection. Accuracy and user-friendliness were achieved through the auto-calibration feature.

Key words: measurement system, auto-calibration, semiconductor device identification, USB, measurement of semiconductor device characteristics.

Vsebina

1 Uvod.....	1
2 Splošno o merjenju karakteristik.....	2
3 Opis delovanja merilnega sistema MSP.....	5
3.1 eProDas sistem zajemanja podatkov.....	5
3.2 Mikrokrmilniški del.....	8
3.3 Kombinirani tokovno-napetostni vir.....	11
3.3.1 Kalibracija vira in merilnikov.....	17
3.4 Generator referenčnih napetosti.....	20
3.5 Merilni del.....	21
3.6 Stikalni del.....	23
3.7 Pregled vseh krmilnih in merilnih signalov.....	28
3.8 Praktična izvedba sistema MSP.....	30
3.9 Programski del.....	32
3.9.1 Merilna aplikacija.....	34
3.9.2 Aplikacija identifikacije elementov.....	35
3.9.3 Uporabniški vmesnik.....	36
3.9.4 Pomožna testna aplikacija.....	40
4 Postopek identifikacije elementov.....	42
4.1 Prva faza identifikacije – prepoznavanje tipa spojev.....	43
4.1.1 Identifikacija spoja A-B.....	45
4.1.1.1 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-A ali G-B, brez ohmskih upornosti.....	46
4.1.1.2 Prevodno orientiran polprevodniški spoj A-G ali B-G, brez ohmskih upornosti.....	47
4.1.1.3 Prevodno orientiran polprevodniški spoj A-G, ohmska upornost B-G.....	48
4.1.1.4 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-A, ohmska upornost B-G.....	49

4.1.1.5 Prevodno orientiran polprevodniški spoj B-G, ohmska upornost A-G.....	50
4.1.1.6 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-B, ohmska upornost A-G.....	50
4.2 Druga faza identifikacije – razvrščanje elementov po skupinah glede na tip spojev.....	51
4.2.1 Elementi z dvema diodnima spojem in brez ohmske upornosti.....	51
4.2.2 Elementi z dvema diodnima spojem in ohmsko upornostjo.....	52
4.2.3 Elementi z enim diodnim spojem in brez ohmske upornosti.....	53
4.2.4 Elementi brez diodnih spojev in z eno ohmsko upornostjo.....	55
5 Analiza merilnih negotovosti.....	56
5.1 Merjenje napetosti.....	57
5.2 Merjenje toka – vir A.....	59
5.3 Merjenje toka – vir B.....	63
6 Zaključek.....	66
7 Literatura.....	67
8 Dodatek A.....	69

Uvod

Diskretni polprevodniški elementi so danes kljub bliskovitem razvoju integriranih vezij še vedno nepogrešljivi pri marsikateri elektronski napravi. Poznavanje njihovih lastnosti in delovanja je za inženirja elektrotehnike nepogrešljivo znanje, saj omogoča razumevanje tudi drugih naprav, ki jih ti elementi sestavljajo.

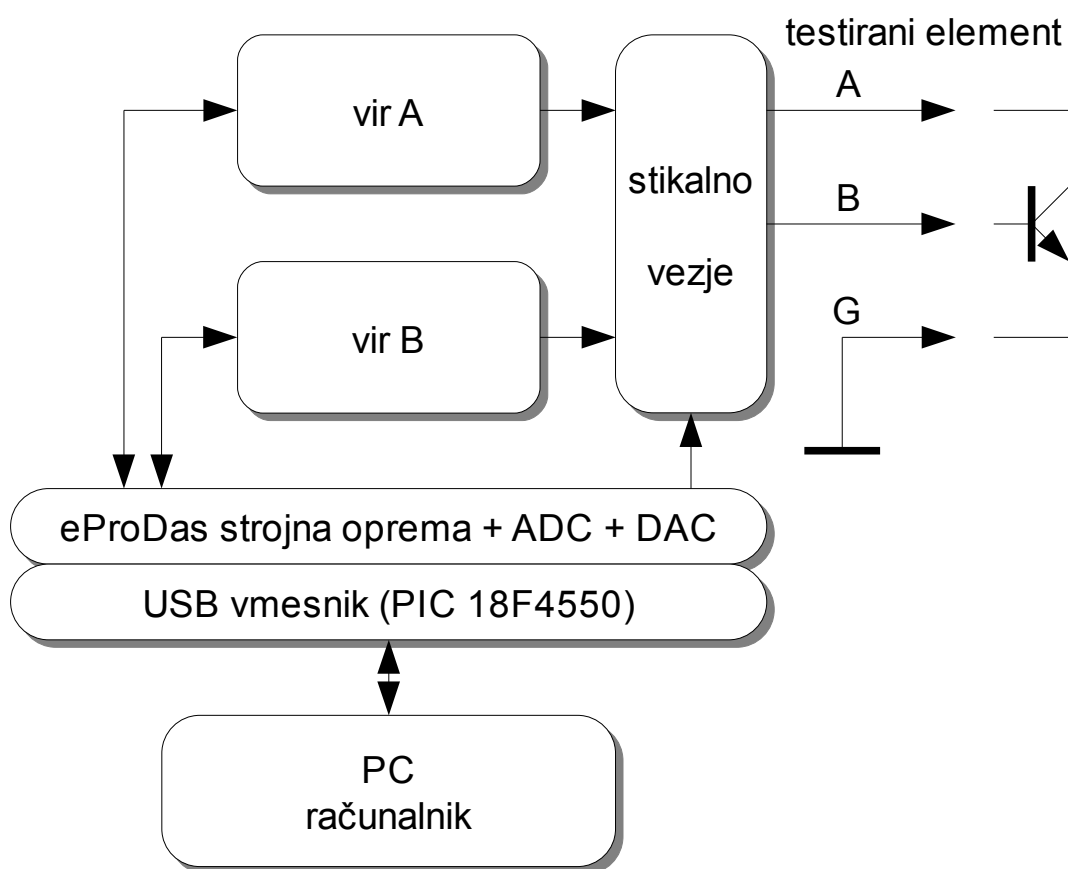
Pri laboratorijskih vajah na fakultetah, kot tudi na tehničnih srednjih šolah, se lastnosti raznih polprevodniških elementov spoznavajo preko merjenja njihovih $U(I)$ karakteristik ob različnih pogojih delovanja. Te meritve so zamudne, saj je potrebno za vsako točko karakteristike ročno nastaviti vzbujanje ter odčitati dobljeni odziv. Iz pedagoškega vidika tak postopek ni nesmiseln, saj se pri njem študentje učijo dela z laboratorijskimi instrumenti.

V primerih, ko je delo z laboratorijskimi instrumenti študentom že dobro poznano, je smiselno večjo pozornost posvetiti dobljenim karakteristikam in ne več toliko postopkom merjenja. Čas, ki bi ga študentje porabili za nastavljanje gumbov na instrumentih, bi lahko koristneje uporabili za spoznavanje uporabnih vezav polprevodniških elementov. Ta dejstva vodijo do spoznanja, da bi bilo avtomatsko merjenje $U(I)$ karakteristik dobrodošla možnost pri učnem procesu spoznavanja polprevodniških elementov.

Cilj diplomske naloge je razvoj pedagoškega avtomatskega merilnega sistema, ki je enostaven za uporabo in popolnoma integriran z osebnim računalnikom, s čimer nudi številne možnosti izvajanja meritev, njihovo obdelavo in prikaz. Sistem krmilimo preko USB vodila. Zasnova sistema omogoča razširitve in izvajanje meritev, ki niso prvotno planirane. To možnost smo izkoristili za implementacijo avtomatske identifikacije polprevodniških elementov, ki poleg določitve tipa elementa (bipolarni tranzistor, JFET, MOSFET, ...) omogoča tudi samodejno določitev razporeda priključnih sponk. Poleg naštetih lastnosti napravo odlikuje tudi sposobnost samokalibracije in velike natančnosti merjenja.

1 Splošno o merjenju karakteristik

Merilni sistem za merjenje karakteristik polprevodnikov (v nadaljevanju sistem MSP) meri karakteristike tako, da določene sponke elementa vzbuja z znanim tokom ali napetostjo, pri tem pa meri dejanske tokove in napetosti na ustreznih sponkah testiranega elementa. Konceptualno zasnovano sistema prikazuje bločna shema na sliki 1.



Slika 1: Bločna shema merilnega sistema MSP.

Naprava MSP je sestavljena iz dveh virov, imenovanih A in B, ki delujeta medsebojno neodvisno, kot napetostni ali tokovni vir. Polprevodniški elementi imajo najpogosteje dve ali tri priključne sponke, zato ima tudi vmesnik za priklop elementa tri sponke. Dve izmed njiju sta priključeni vsaka na svoj vir, tretja pa je povezana z maso vezja. Ker sta oba vira bipolarna (lahko proizvedeta tako pozitivne kot negativne izhodne napetosti, tokova lahko tečeta v obe smeri), vira za tretjo sponko elementa ne potrebujemo, saj lahko nastavimo poljubne napetosti

med sponkami samo s pomočjo dveh virov in mase.

Vira, ki sestavljata sistem MSP, nimata enakih specifikacij. Razpon možnih izhodnih napetosti je pri obeh enak ($\pm 7,8$ V), razlikujeta pa se v razponu izhodnih tokov. Pri viru A znaša le-ta ± 85 mA, pri viru B pa $\pm 8,5$ mA. Zapisane napetosti so le približne, ker so skrajne točke obsega instrumenta odvisne od toleranc in napak elementov v vezju. Ta raznoličnost tokovnih obsegov obeh virov nam omogoča, da pri merjenju bipolarnega tranzistorja kolektor napajamo s tokovnim virom večjega razpona, bazo pa s tokovnim virom manjšega razpona (ker so kolektorski tokovi večji od baznih). Manjši razpon vira B omogoča večjo ločljivost pri nastavitvi izhodnega toka, ki je pri majhnih baznih tokovih pomembna.

Polprevodniške elemente, katerih določeni sponki izkazujeta nizkoimpedančni značaj (prevodno vzbuja PN spoj), med testiranjem in identificiranjem vzbuja s tokovnim virom, ker nam to preprečuje morebitne okvare spojev zaradi prevelikih tokov. Karakteristika polprevodniškega spoja je izrazito nelinearna, zato že majhne spremembe napetosti nad kolensko napetostjo povzročijo veliko spremembo toka, ki je lahko usodna.

Kolenska napetost se razlikuje od elementa do elementa, spreminja pa se tudi z nekaterimi dejavniki iz okolja, še posebej s temperaturo. Napetostno vzbuja prevodno vzbuja polprevodniškega spoja torej ne pride v poštev, saj pri njem ne moremo vnaprej predvideti, kolikšen tok bo stekel skozi element, oziroma kako velika toplotna moč se bo na njemu sproščala.

Uporaba tokovnega vzbuja pri identifikaciji tipa elementa je problematična v tem, da ne vemo vnaprej, kateri tip elementa je uporabnik vstavil v napravo. Če je vstavljeni element MOSFET, ga lahko s tokovnim vzbujanjem vrat uničimo (tokovni vir preko visoke impedance vrat ne more pognati želenega toka, zato pride vir v stanje nasičenja, kjer je izhodna napetost lahko previsoka in vodi do preboja dielektrika med vrati in kanalom). Za take primere ima sistem MSP vgrajen omejevalnik izhodne napetosti, ki ga po potrebi programske vključimo. Na ta način se s primerno strategijo tipanja testiranega elementa izognemo njegovemu morebitnemu uničenju.

Enaka omejitev izhodne napetosti je potrebna tudi pri bipolarnem tranzistorju - predvsem pri napetosti v zaporni smeri spoja baza – emitor. Če je ta napetost previsoka (meja je zelo nizka, lahko že 5 V), se v tranzistorju sprožijo fizikalni procesi, ki povzročijo degradacijo elementa. Te okvare so kumulativne, poleg slabljenja parametrov elementa pa krajšajo tudi njegovo življenjsko dobo in ga nazadnje tudi popolnoma uničijo.

2 Opis delovanja merilnega sistema MSP

Merilni sistem MSP lahko funkcionalno razdelimo na več podsklopov. Pri opisu virov se slike vedno nanašajo na vir A, medtem ko bodo konstrukcijske razlike med vezjema obeh virov navedene v besedilu, ne bodo pa posebej navedene razlike v krmilnih signalih (sklopi posameznih virov so krmiljeni vsak preko lastnih krmilnih linij).

2.1 eProDas sistem zajemanja podatkov

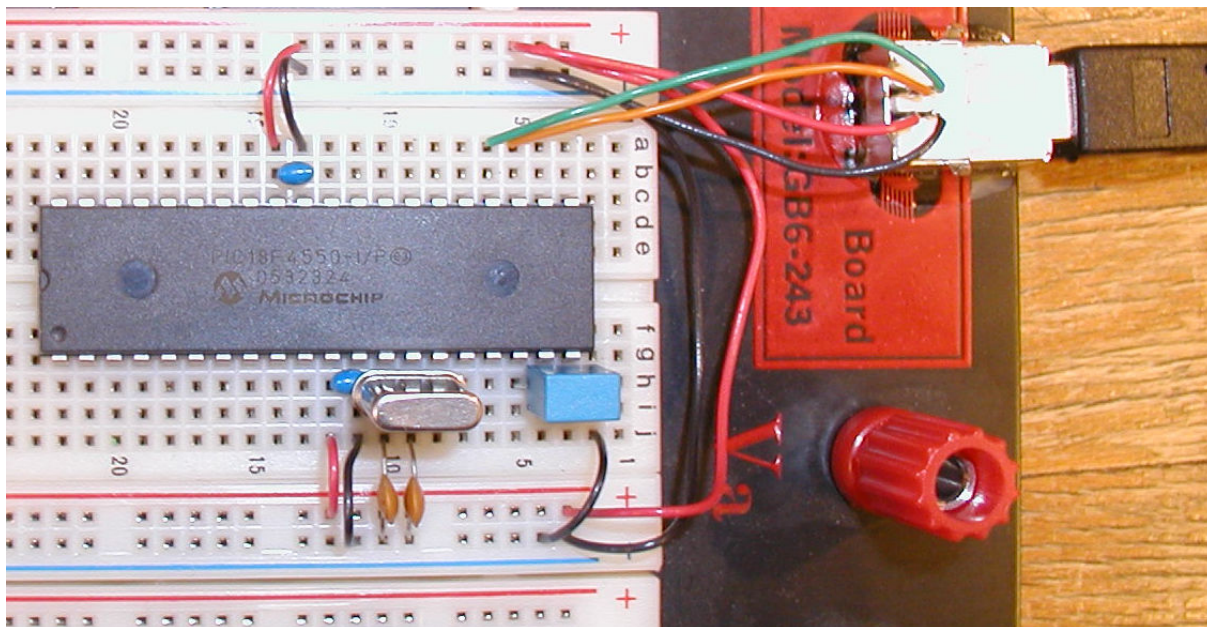
Vsak merilni sistem mora tako ali drugače posredovati dobljene meritve uporabniku. Pogosto uporabljena metoda za doseg tega cilja je prenos podatkov preko enega izmed standardnih komunikacijskih vmesnikov na osebni računalnik, kjer se meritve prikažejo oziroma po potrebi ustrezno obdelajo. To rešitev uporablja tudi sistem MSP, saj nam prenos podatkov na osebni računalnik omogoča nazoren prikaz izmerjenih rezultatov in odpira številne možnosti njihove obdelave in shranjevanja, hkrati pa nam omenjena povezava omogoča popoln programski nadzor nad strojno merilno opremo in izvedbo merjenja.

Odločitev glede izbire komunikacijskega vmesnika MSP naprave ni bila težka, ker smo bili že na samem začetku projekta seznanjeni z eProDas sistemom za laboratorijski zajem podatkov. Ta se je tekom razvoja naprave izkazal kot dobra rešitev, saj nam je nudil vse, kar smo za implementacijo MSP sistema potrebovali, tako v smislu krmilne strojne opreme, kot tudi programske opreme.

eProDas sistem je nastal v okviru evropskega projekta **Leonardo da Vinci ComLab2**. Razvit je bil kot cenen in prilagodljiv vmesnik za zajem podatkov, namenjen uporabi v izobraževanju, ali kot splošno namenska osnova za izvedbo splošnonamenskih mikrokrmilniških aplikacij.

V najosnovnejši obliki strojno opremo sistema eProDas sestavlja Microchipov mikrokrmilnik PIC 18F4550 [1], ki je preko USB povezave [23] [1, str. 163] priključen na osebni računalnik. Mikrokrmilnik nadzoruje vgrajena programska oprema (firmware), ki ukaze, prejete preko

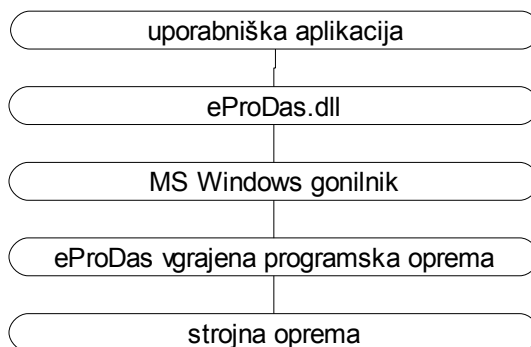
USB povezave interpretira, ter izvede ustrezno akcijo. Na ta način je mogoče uporabljati vse v mikrokrmilnik vgrajene naprave (AD pretvornike, primerjalnike, komunikacijske vmesnike, vhodno/izhodne sponke, ...). Izgled osnovnega eProDas sistema na prototipni plošči prikazuje slika 2.



Slika2: Najosnovnejša eProDas naprava na prototipni plošči.

Na strani osebnega računalnika nam eProDas gonilnik in programski vmesnik (API) nudita hitro in enostavno pot, preko katere dosežemo želeno akcijo na strojni opremi. Pošiljanje ukazov in branje pridobljenih podatkov je izvedeno preko API funkcij, katere kličemo iz programov, napisanih v C/C++, Delphi-ju, LabView-ju ali Visual Basicu. Paket eProDas sestavljajo brezplačen gonilnik, dinamično povezana API knjižnica eProDas.dll, API definicije za razne programske jezike, demonstracijske aplikacije in obsežen priročnik z dobro dokumentiranimi API funkcijami ter navodili za izdelavo strojnega dela.

Sistem eProDas sestavlja pet nivojev, kot prikazuje slika 3.



Slika 3: Pet nivojev sistema eProDas.

Po vrsti od najnižjega do najvišjega nivoja si sledijo:

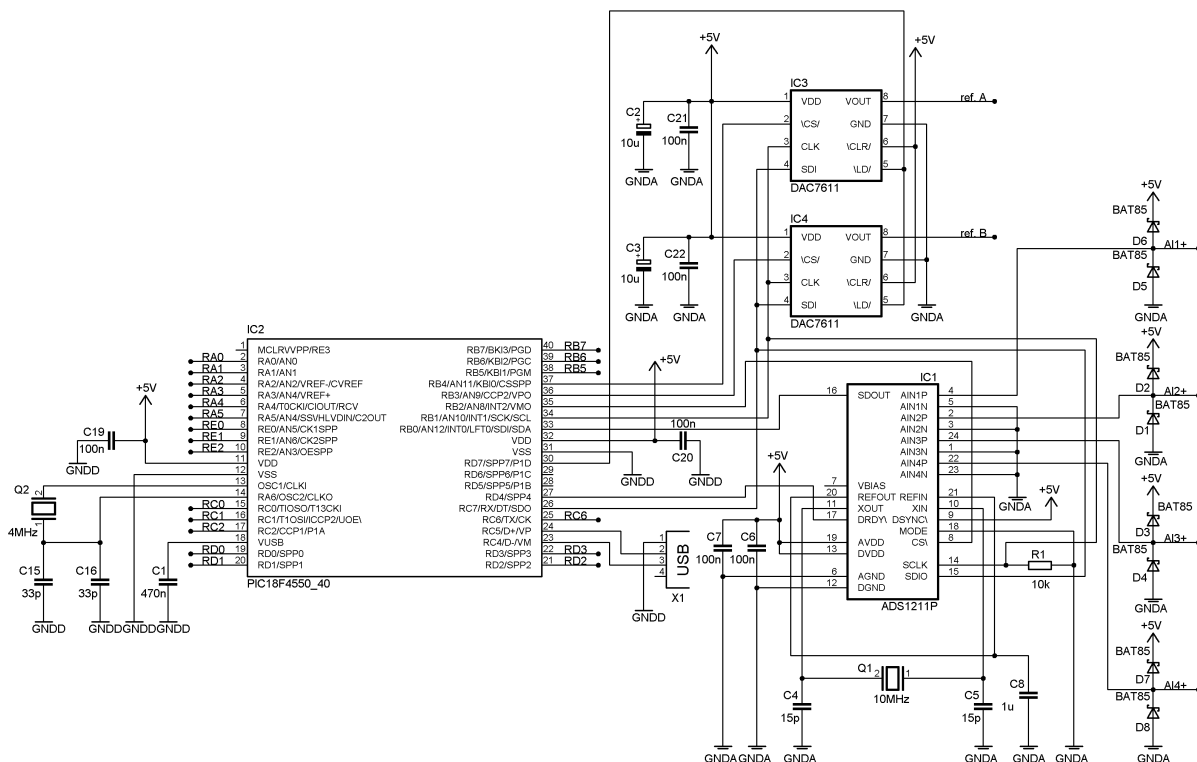
- strojna oprema – v najosnovnejši obliki je to mikrokrmilnik PIC 18F4550, ki ima vgrajen USB vmesnik ter veliko drugih perifernih naprav. Okoli njega so nanizani vsi elektronski elementi, ki so pri posamezni aplikaciji potrebni,
- eProDas vgrajena programska oprema (firmware) – programska oprema, ki je vpisana v PIC mikrokrmilnik. Njena naloga je vzpostavljanje USB komunikacije med osebnim računalnikom in mikrokrmilnikom ter izvrševanje ukazov, dobljenih iz računalnika. Prav tako skrbi za vračilo rezultatov po isti povezavi v obratni smeri,
- Windows gonilnik – eProDas sistem zahteva svoj poseben gonilnik. Čeprav ima operacijski sistem MS Windows vgrajene gonilnike za nekatere osnovne tipe USB naprav, je eProDas sistem preveč specifičen, da bi lahko uporabljal že vgrajene,

- eProDas.dll – dinamično povezana knjižnica, ki vsebuje uporabniške funkcije z različnimi ukazi za eProDas strojno opremo. Tvori API (Application Programming Interface) vmesnik, ki uporabniku olajša delo z definiranjem višjenivojskih funkcij. Nekaj primerov akcij, ki jih te funkcije omogočajo, je branje iz AD pretvornika, pošiljanje podatka po SPI vodilu, branje oziroma nastavljanje stanja mikrokrmilnikovih vhodno-izhodnih sponk in podobno,
- uporabniška aplikacija – to je poljuben program, ki ga uporabnik napiše v enem izmed podprtih programskih jezikov (C/C++, Delphi, Visual Basic), pri čemer uporablja API funkcije knjižnice eProDas.dll.

Osnovni eProDas sistem nadgradimo tako, da na mikrokrmilnik priključimo ostale elektronske elemente, ki jih potrebujemo za izvedbo aplikacije. Priključimo jih preko različnih vodil, kot so SPI, UART, splošnonamenske vhodno/izhodne sponke, ... Za nekatere zunanje AD in DA pretvornike že obstajajo API funkcije, ki omogočajo takojšnjo uporabo. Za ostale je možno napraviti ustrezen vmesnik preko tako imenovane „prenosne hrbtenice“ [2], ki omogoča, da v en USB paket združimo več akcij, ki so sestavni del kompleksnega komunikacijskega protokola določenega integriranega vezja.

2.2 Mikrokrmilniški del

Krmilno in komunikacijsko jedro MSP prikazuje slika 4. Zgrajeno je na osnovi mikrokrmilnika PIC 18F4550 z vgrajeno programsko opremo eProDas, ki jo dopolnjujeta še dva 12-bitna DA pretvornika DAC7611 [3] in en štirikanalni 24-bitni AD pretvornik ADS1211 [4]. Vsako integrirano vezje obdajajo elementi, nujni za njihovo delovanje: kvarčni kristal za mikrokrmilnik in AD pretvornik, blokirni kondenzatorji za dušenje tokovnih konic na napajalnih vodih ter stabilno delovanje. Vsa integrirana vezja komunicirajo z mikrokrmilnikom preko SPI povezave.



Slika 4: Mikrokrmilniški del vezja.

Pomembno je pravilno ločevanje mas, ker je ta del vezja hkrati vmesnik med digitalnimi in analognimi signali v napravi. Digitalno maso uporablja mikrokrmilnik (IC2), saj to integrirano vezje zaradi svojega digitalnega in visokofrekvenčnega značaja preko tokovnih konic na napajalnih vodih povzroča znatne motnje. Te bi se v primeru skupne mase prenesle na analogni del vezja ter povzročale šum pri meritvah.

Oba DA pretvornika (IC3, IC4) in AD pretvornik (IC1) so vezani na analogno maso. Na shemi je tip posameznih mas označen z različnima simboloma in napisom GNDD pod digitalnimi ter GNDA pod analognimi masami. Fizično sta masi izvedeni v obliki ločenih masnih ploskev (ang.: ground plane) na tiskanem vezju, ki sta povezani v eni skupni točki.

DA pretvornika generirata referenčni napetosti za izhodni veličini sistema MSP; IC3 daje referenčno napetost viru A, IC4 pa viru B. DA pretvornika sta 12-bitna in za svoje lastno delovanje ne potrebuje zunanjih napetostnih referenc, ker ju imata že integrirani. Nominalno območje izhodnih napetosti obsega vrednosti od 0 V do 4,095 V, zato znaša nominalna ločljivost nastavitve izhodne napetosti DA pretvornikov 1 mV.

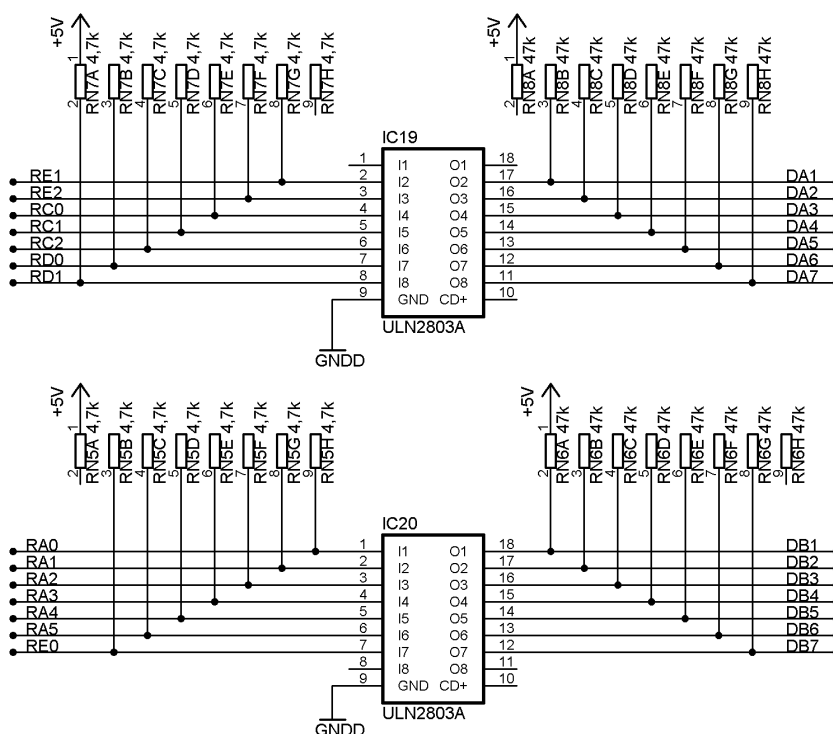
Analogni vhodi AD pretvornika so popolnoma diferencialni, z največjim dopustnim napetostnim območjem od 0 V do 5 V. Da morebitne večje napetosti od teh ne poškodujejo AD pretvornika, smo le-tega zaščitili s Schottky-jevimi diodami BAT85 (D1 – D8) [5]. Schottky-jeve diode smo izbrali zaradi njihove visoke hitrosti preklopa in nizke kolenske napetosti (približno 0,3 V). Pri uporabi navadnih diod bi bila zaradi večje kolenske napetosti omejitev napetostnega območja na vhodu AD pretvornika premajhna, kar bi potencialno vodilo v okvare pretvornika.

V začetku razvoja sistema MSP smo najprej uporabljali 12-bitni AD pretvornik MCP3208 [6], kar je posledično vodilo v bolj zapleteno vezje. Pri 12 bitni ločljivosti zajema smo namreč morali uporabiti merilna območja, katerih izvedba zahteva dodatne elemente, da bi dosegli želeno ločljivost merjenja. Poleg tega je merilni sistem z več območji težje kalibrirati, saj moramo postopek kalibracije izvesti na vsakem merilnem območju posebej. Kljub uporabi merilnih območij ni bilo možno zagotoviti potrebne ločljivosti pri višjih vrednostih merjene veličine, zato je vgradnja 24-bitnega AD pretvornika v sistem pomenila znatno izboljšavo.

V merilnem sistemu vseh 24 bitov zajema nismo izkoristili, saj bi bilo tako ločljivost težko doseči (potrebovali bi dražje, kakovostnejše in nižješumne elemente analogne obdelave signalov) in je za namen uporabe sistema tudi ne potrebujemo. Odločili smo se za ločljivost 17 bitov, ki so jo na prototipni plošči med razvojem šum in motnje sicer pokvarili, a se je kasneje izkazala za dosegljivo na tiskanem vezju.

Vmesnik za izvedbo USB povezave je že vgrajen v uporabljenem mikrokrmilniku in ne zahteva dodatnih zunanjih elementov (razen pomožnih, kot sta vtičnica X1 in kondenzator C1). Zaradi občutljivosti uporabljenih integriranih vezij na nihanja napajalne napetosti, smo se odločili za samostojno napajanje digitalnega dela vezja in nismo uporabili možnosti napajanja preko USB vodila. Napetost 3,3 V, ki je potrebna za delovanje USB vodila, mikrokrmilnik sam proizvaja, za kar potrebuje zunanji kondenzator C1 vrednosti 470 nF.

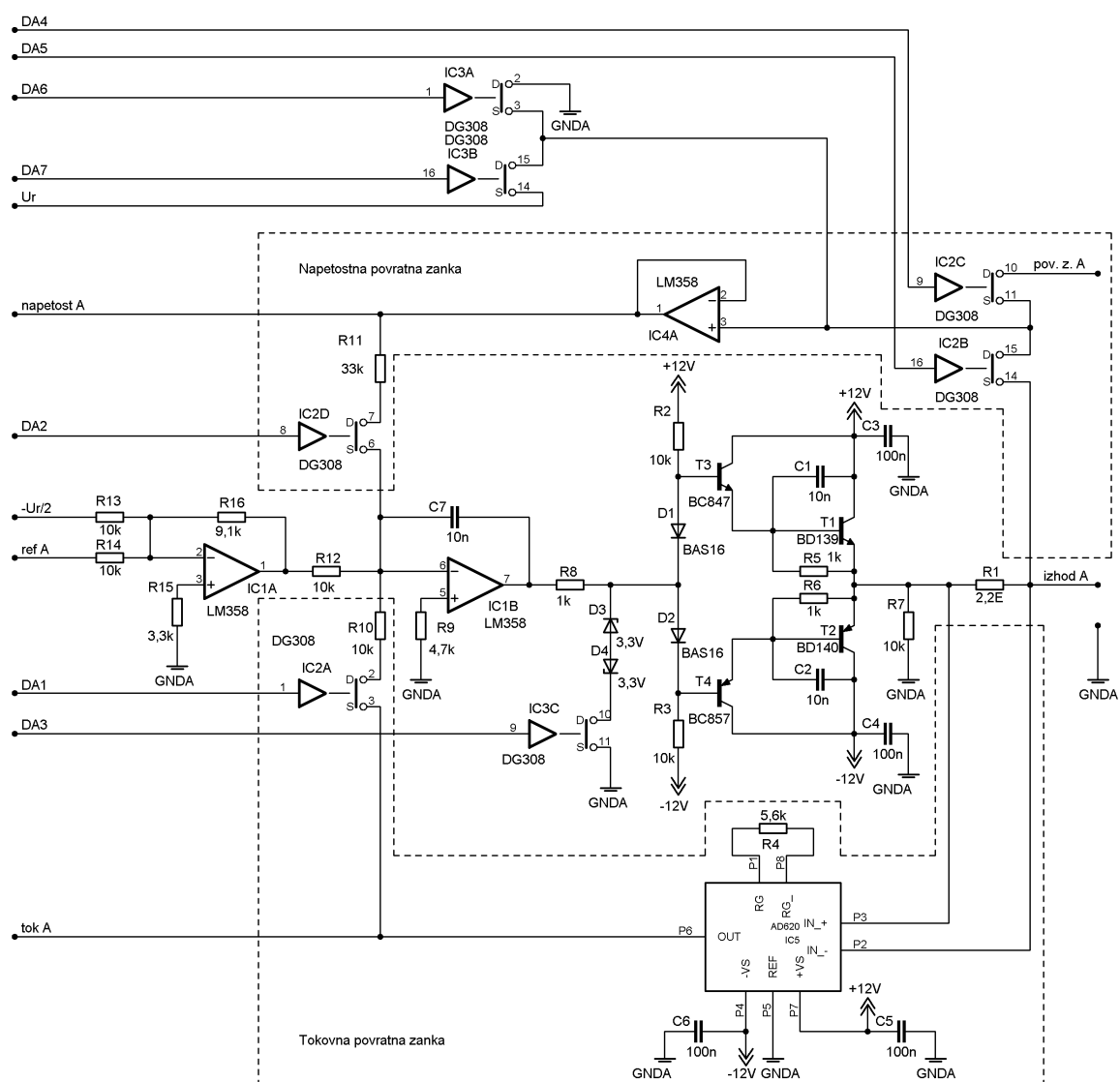
Mikrokrmilnik upravlja ostale dele sistema MSP preko digitalnih signalov, ki prožijo ustrezna analogna CMOS stikala. Ker za pravilno proženje omenjenih stikal potrebujemo napetost 12 V na krmilnem vhodu, moramo 5 V signale na mikrokrmilnikovih sponkah pretvoriti na višji napetostni nivo, kar izvedemo z integriranim poljem darlington tranzistorjev ULN2803A [7] (IC19 in IC20), kot to prikazuje slika 5.



Slika 5: Pretvornik napetostnih nivojev 5 V logike na nivoje 12 V logike.

Ob vklopu naprave, ko mikrokrmilnik še ni inicializiran, zagotavljajo upori na vhodnih sponkah (RN5 in RN7), da so vsa analogna CMOS stikala zaradi varnosti razklenjena. Uporabljeni pretvornik napetostnih nivojev vhodne signale negira, kar je potrebno upoštevati pri izvedbi programske opreme.

2.3 Kombinirani tokovno-napetostni vir



Slika 6: Kombinirani tokovno-napetostni vir A.

Vir smo realizirali s pomočjo operacijskega ojačevalnika LM358 (IC1B na sliki 6) [8], ki krmili izhodno stopnjo komplementarnih parov bipolarnih tranzistorjev (tranzistorji T1, T2,

T3 in T4 s spremljajočimi elementi) tako, da preko ustreznih povratnih zank zagotovi reguliran izhodni tok oziroma napetost. Katera veličina se bo regulirala, določimo z vključitvijo želene povratne zanke. Slika 6 prikazuje shemo vira, ki vsebuje tudi elemente, namenjene kalibraciji. Obe povratni zanki sta na shemi označeni s črtkano črto.

Preklop zank je izveden elektronsko, preko analognih CMOS stikal DG308 [9] (IC2A, IC2B, IC2C in IC2D). Ta tip CMOS stikal smo izbrali zaradi širokega področja delovnih napetosti (± 20 V pri bipolarnih signalih). Običajna CMOS stikala CD4066 [10] delujejo le z bipolarnimi signali v območju $\pm 7,5$ V, kar je v našem primeru premalo. Krmiljenje stikal DG308 zahteva 12 V krmilne signale, ki jih preko vhodov DA1 – DA7 pripeljemo iz pretvornika napetostnih nivojev (slika 5).

Napetostna povratna zanka je izvedena tako, da se izhodna napetost preko napetostnega sledilnika IC4A, CMOS stikala IC2D in upora R11, s katerim nastavimo ojačenje vhodne referenčne napetosti, vrača na invertirajočo sponko krmilnega operacijskega ojačevalnika IC1B. Napetostni sledilnik IC4A je nujno potreben, saj bi brez njega preko povratne zanke tekkel tok, ki bi motil meritev izhodnega toka (izhodna napetost in tok vira se stalno merita).

Za pravilno sklenitev napetostne povratne zanke sta pomembni še stikali IC2C in IC2B. IC2C sklene zunanjo zanko neposredno s sponke testiranega elementa, medtem ko IC2B sklene notranjo zanko, ki se uporablja le pri kalibraciji, kadar testirani element ni sklenjen z virom. S stabilnostjo napetostne regulacije nismo imeli posebnih težav, zato se tudi ta sklop med razvojem naprave ni veliko spreminjal.

Tokovna povratna zanka je izvedena posredno, s pomočjo merjenja padca napetosti na upor R1, preko katerega teče celotni tok vira. To napetost približno 10-kratno ojača instrumentacijski ojačevalnik IC5 (AD620) [11], katerega izhodno napetost vodimo na vhod krmilnega operacijskega ojačevalnika IC1B.

Tako sklenjena zanka omogoča učinkovito regulacijo izhodnega toka, vendar ima tudi nekaj pomanjkljivosti. Najbolj očitna je potreba po instrumentacijskem ojačevalniku z visokim parametrom CMRR, saj predstavlja izhodna napetost vira sofazno napetost, ki se oslABLJENA za faktor CMRR, deljenim z ojačenjem instrumentacijskega ojačevalnika IC5, vodi v tokovno povratno zanko in povzroča napako izhodnega toka. Ta pojav tudi dodatno znižuje notranjo upornost tokovnega vira.

CMRR uporabljenega instrumentacijskega ojačevalnika AD620 znaša pri 10-kratnem protifaznem ojačenju od 93 do 110 dB. V praksi ocenjen CMRR je znašal minimalno 100 dB, kar vnaša pri viru A največjo napako merjenja toka $\pm 23 \mu\text{A}$, pri viru B pa $\pm 2,3 \mu\text{A}$. Razlika je posledica dejstva, da je vrednost merilnega upora R1 pri viru A desetkrat manjša kot pri viru B, ker je maksimalni izhodni tok vira A desetkrat večji od izhodnega toka vira B, izhod instrumentacijskega ojačevalnika IC5 pa mora biti v obeh primerih enak približno 2V pri maksimalnem izhodnem toku.

Pred uporabo instrumentacijskega ojačevalnika AD620, smo se posluževali drugega tipa – LT1101 [12]. Ta ojačevalnik odlikuje že natančno kalibrirano ojačenje vrednosti 10 ali 100. Za prehod na AD620 smo se odločili, ker ima LT1101 za uporabo v tej aplikaciji preozko območje dovoljenih vhodnih sofaznih napetosti. Slabost se je pokazala predvsem v primeru, ko je tokovni vir napajal breme s preveliko upornostjo, da bi bilo možno preko njega pognati želeni tok. V tem primeru so bili dobljeni odčitki toka povsem napačni, ker je napetost na bremenu (ki hkrati predstavlja sofazno napetost na vhodu LT1101) prekoračila dovoljeno vhodno območje ojačevalnika, izhod le-tega pa se je posledično postavil v pozitivno ali negativno nasičenje. Nenatančno (z zunanjim uporom R_4) določeno ojačenje AD620 nas pri prehodu z LT1101 ne ovira, ker programsko vodena kalibracija izniči toleranco tega parametra, ki tako ne vpliva na točnost merilnega rezultata.

Ker smo imeli pri načrtovanju naprave v mislih cenenost sistema, smo na začetku opravili tudi teste z diskretno sestavljenim instrumentacijskim ojačevalnikom. Znano je, da na faktor CMRR v vezju instrumentacijskega ojačevalnika, sestavljenega in treh operacijskih ojačevalnikov, odločilno vpliva usklajenost upornosti uporov v vezju. Poskusi so pokazali, da kljub uporabi izbranih uporov, sortiranih po čimbolj enakih upornostih, ne bi mogli doseči dovolj velikega faktorja CMRR.

Pri razvoju vira smo naleteli tudi na nestabilnost vezja v režimu tokovnega vira. Na začetku je bil vir zasnovan na topologiji vezja neinvertirajočega ojačevalnika - osnovna vezava krmilnega operacijskega ojačevalnika je bila neinvertirajoča s povratno zanko, sklenjeno preko močnostne izhodne stopnje. Ta način se je obnesel pri napetostnem viru, ne pa pri tokovnem viru, kjer je izhodni tok močno osciliral, kljub številnim poskusom stabilizacije. Zaradi tega smo po zgledu iz literature [13] uporabili topologijo invertirajočega ojačevalnika, ki se je izkazala za stabilno.

Pri invertirajoči topologiji uporabljamo krmilni operacijski ojačevalnik IC1B kot generator virtualne mase, tokovi iz povratnih zank in referenčne veje pa se med seboj seštevajo tako, da se odstopanja med njimi izničijo, s čimer dobimo reguliran sistem.

Da bi zagotovili stabilnost vezja, smo morali zadostiti dodatnim pogojem. Tukaj velja omeniti predvsem zakasnitve znotraj regulacijske zanke, ki se pojavi kot posledica različnih hitrosti delovanja instrumentacijskega ojačevalnika IC5 v vlogi merilnega pretvornika za merjenje toka, krmilnega operacijskega ojačevalnika IC1B in izhodne močnostne stopnje. Pasovna širina enotnega ojačenja pri uporabljenih operacijskih ojačevalnikih LM358 znaša tipično 1,3 MHz, maksimalna hitrost spreminjanja izhodne napetosti (ang.: slew-rate) pa 0,4 V/ μ s. Prvotno uporabljen instrumentacijski ojačevalnik LT1101 je imel pasovno širino pri uporabljenem ojačenju le 37 kHz in slew-rate 0,1 V/ μ s. Precej bolj ugodne lastnosti nudi AD620, katerega pasovna širina pri uporabljenem ojačenju (10) znaša 800 kHz in slew-rate 1,2 V/ μ s. Kljub temu merilna veja (povratna zanka) ni občutno hitrejša od sistema, ki ga reguliramo, zato bi bilo brez dodatnih ukrepov vezje na meji stabilnosti.

Oscilacije, nastale zaradi prepočasne povratne zanke, smo odpravili z omejevanjem pasovne širine krmilnega operacijskega ojačevalnika IC1B. V ta namen smo v vezje vključili kondenzator C7 vrednosti 10nF. Pri višjih frekvencah se kondenzatorju impedanca manjša, kar učinkovito zmanjša ojačenje reguliranega sistema.

Ker mora vir omogočati bipolarno delovanje, je potrebno vhodno unipolarno referenčno napetost spremeniti v bipolarno. To nalogo opravlja operacijski ojačevalnik IC1A v vlogi seštevalnika, ki izhodni napetosti DA pretvornika prišteje negativno napetost vrednosti približno -2,048V (iz vhoda $-U_r/2$). Napetost $-U_r/2$ ni precizna, toda napaka njene vrednosti se skupaj z ostalimi napakami (predvsem napetostnimi premiki operacijskih ojačevalnikov) programsko kompenzira.

Ojačenja v vezju niso precizno določena, saj so odvisna od toleranc uporabljenih uporov. Te napake so dopustne in ne vplivajo na točnost meritev ter nastavitve izhodne napetosti oziroma toka, saj se skupno kompenzirajo pri kalibraciji. Upora R14 in R16, ki določata ojačenje referenčne napetosti, sta namenoma izbrana tako, da vezje dejansko oslabi referenčno napetost za slabih 9 %. To je potrebno, da zaradi napetostnih premikov ter napak v ojačenju ne pride do prekoračitve obsega vhodnih napetosti AD pretvornika.

Močnostna izhodna stopnja vira je izvedena s komplementarnim parom tranzistorjev T1 (BD139) [14] in T2 (BD140) [15]. Da bi dosegli visok faktor tokovnega ojačenja in tako čimmanj obremenili izhod krmilnega ojačevalnika IC1B, smo izhodnima tranzistorjema srednje moči T1 in T2 dodali še tranzistorja T3 (BC847) [16] in T4 (BC857) [17] ter tako tvorili Darlingtonovo vezavo. Tranzistorja T1 in T2 smo izbrali na podlagi njune primerne termične disipacije, dokaj visokega faktorja tokovnega ojačenja, cenenosti in razširjenosti.

Da bi preprečili morebitne oscilacije tranzistorjev (parazitne oscilacije emitorskega sledilnika), smo med bazi in kolektorja tranzistorjev T1 in T2 vgradili kondenzatorja C1 in C2 vrednosti 10 nF. Upora R5 in R6 služita odvajanju električnega naboja s tranzistorjev T1 in T2, ki bi sicer povzročal počasno zapiranje tranzistorjev, ki je značilno za Darlington vezavo. Upor R7 odvaja morebitne parazitne tokove iz močnostne stopnje na maso in poskrbi, da je potencial na izhodu močnostne stopnje vedno določen, tudi kadar ni nobenega bremena na izhodu. Tok preko tega upora ne vpliva na izmerjeni tok, ker ne teče preko merilnega upora R1.

Močnostna stopnja deluje v B razredu ojačenja; ob odsotnosti krmilnega signala so tranzistorji zaprti. Da bi nekoliko znižali potreben prag za odprtje tranzistorjev (približno 1,2V, zaradi Darlington vezave), smo bazi obeh tranzistorjev opremili z dvema diodama BAS16 (D1, D2) [18], ki zagotavljata ustrezno prednapetost. Ta zniža napetostni prag za odprtje izhodnih tranzistorjev na 0,6V. Tok skozi diodi D1 in D2 omejujeta upora R2 in R3.

Omejevalnik izhodne napetosti je zgrajen iz zaporedne vezave dveh Zenerjevih diod (D3 in D4) napetosti 3,3 V, vezanih ena proti drugi, kar omogoča simetrično omejevanje napetosti v pozitivni in negativni smeri. Praktično izmerjena vrednost omejitve znaša $\pm 3,9$ V. Omejevalnik napetosti vključimo ali izključimo iz vezja s pomočjo analognega CMOS stikala IC3C. Tok preko njega omejuje upor R8.

Shema vira B na tem mestu ni podana, ker se od sheme vira A razlikuje le v upornosti upora R_1 , ki znaša pri viru A $2,2\ \Omega$, pri viru B pa $22\ \Omega$ (zaradi različnih specifikacij največjih možnih izhodnih tokov).

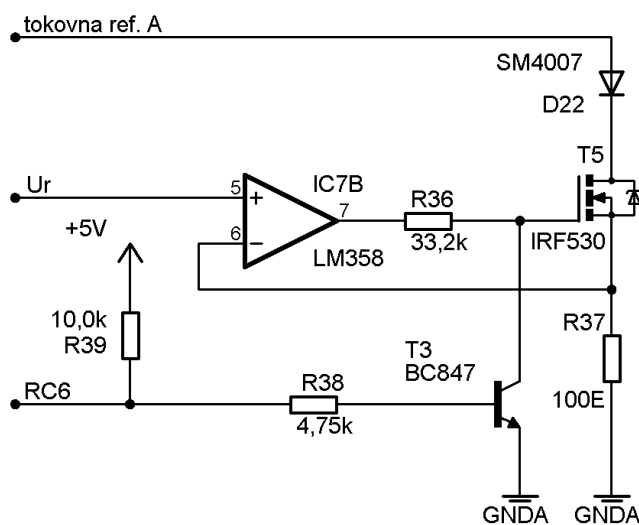
2.3.1 Kalibracija vira in merilnikov

Pomemben del razvoja sistema MSP je implementacija enostavne in zadosti natančne samodejne kalibracije virov in merilnikov. Napetostna veja se kalibrira dvotočkovno – pri napetostih 0 V in 4,096 V (vhod Ur). Ti napetosti se v času kalibracije na podlagi ukaza mikrokrmilniškega vezja privedeta na vhod napetostnega sledilnika merilne veje IC4A preko CMOS stikal IC3A in IC3B, medtem sta merilna veja in napetostna povratna zanka ločeni s stikali IC2C in IC2B.

Kalibracija merilnika napetosti poteka tako, da program prebere vrednost na AD pretvorniku v obeh točkah in iz teh podatkov izračuna, kolikšno napetost predstavlja en kvantizacijski nivo ter katera vrednost na izhodu AD pretvornika (in sledilnika IC4A) predstavlja napetost 0V (določi se torej ojačenje in premik merilne veje).

Kalibracija vira poteka na podoben način, le da si tokrat pomagamo z že prej kalibrirano napetostno merilno vejo. Postopek kalibracije poteka po sledečem zaporedju: na referenčni vhod vira A privedemo napetost 0 V in izmerimo napetost na izhodu vira. Enako meritev ponovimo še pri maksimalni vrednosti reference (4,095 V) in pri srednji vrednosti reference (2,048 V). Iz izmerjenih skrajnih vrednosti program izračuna, kakšno vrednost napetosti predstavlja en kvant DA pretvornika, srednja vrednost pa služi izračunu premika vira. Omenjene kalibracijske konstante se shranijo in služijo nastavitvi izhodne napetosti ter korigiranju nadaljnjih merjenj.

Pri kalibraciji tokovnega vira in merilnika toka potrebujemo tokovno referenco. Ker imata vira A in B različni območji izhodnega toka, je potrebna uporaba dveh referenc z različnima nazivnima tokovima. Načeloma bi lahko kalibrirali oba vira z eno tokovno referenco, ki bi imela dovolj nizek izhodni tok, da bi bil primeren za oba vira, toda zaradi natančnosti kalibracije je bolje, da se obe točki kalibracije postavi čim dlje narazen. Shema tokovne reference vira A je razvidna s slike 7.



Slika 7: Tokovna referenca vira A.

Tokovna referenca je zgrajena v obliki tokovnega ponora z MOSFET tranzistorjem IRF530 [19]. Za MOSFET tranzistor smo se odločili, ker ga je lažje krmiliti zaradi njegove visoke vhodne impedance med vrati in izvorom. Da bi izhodni tok ostal čimbolj konstanten, skrbi operacijski ojačevalnik IC7B, ki v povratni zanki krmili MOSFET T5 tako, da je napetost na merilnem uporu R37 vedno enaka referenčni napetosti U_r . Iz tega sledi, da je tudi tok skozi R37 konstanten in enak $U_r/R37$.

Tokovna referenca mora imeti možnost krmiljenja, da jo lahko po potrebi izklopimo. To funkcijo opravlja tranzistor T3 (BC847) z upori R36, R38 in R39. R38 in R39 skrbita, da ob odklopu krmilne linije (npr. ob zagonu mikrokrmilnika, ko se krmilna sponka postavi v stanje visoke impedance) tokovni ponor ni aktiven. Aktiviramo ga tako, da krmilno linijo RC6 postavimo na potencial 0 V, s čimer se tranzistor T3 zapre in operacijski ojačevalnik IC7B lahko nemoteno krmili MOSFET in vzdržuje napetost na R37. Kadar je T3 odprt, je napetost

na vratih MOSFET-a enaka napetosti nasičenja med kolektorjem in emitorjem. Ta napetost je manjša od pragovne napetosti MOSFET tranzistorja, zato se njegov kanal ne more vzpostaviti.

Dioda D22 (SM4007) [20] je prisotna zaradi bipolarnosti vira. Brez nje bi ob negativni napetosti na izhodu vira preko MOSFET tranzistorja stekel tok zaradi v njem vgrajene diode med izvorom in ponorom.

V napravi imamo dve opisani tokovni referenci, ker sta za kalibracijo pri vsakem viru potrebni drugačni vrednosti referenčnega toka. Med obema referencama je razlika v upornosti upora R37, ki neposredno določa izhodni tok. Pri viru A je vrednost upora R37 enaka $100\ \Omega$, pri viru B pa $1\ \text{k}\Omega$.

Pred izdelavo opisanega tokovnega ponora smo opravili poskuse tudi z drugačnimi vezji. Prva verzija je bila podobna obstoječi, le da je bil izvor MOSFET tranzistorja vezan na negativno napajanje $-12\ \text{V}$ namesto na maso. Prednost te vezave je bila, da dioda D22 ni bila potrebna, ker je bil kanal med ponorom in izvorom vedno pozitivno orientiran. Kljub temu se rešitev ni obnesla, ker je povzročal tokovni ponor, katerega referenčna točka je bila negativna napajalna napetost, preveliko sofazno napetost na izhodu vira, katerega negativna referenca je bila masa. To je povzročalo napako pri merjenju toka, saj je instrumentacijski ojačevalnik vira prešel v nasičenje. Tako vezje bi zahtevalo tudi dodatno precizijsko referenco, ker bi morala biti njena masna sponka vezana na negativno napajanje.

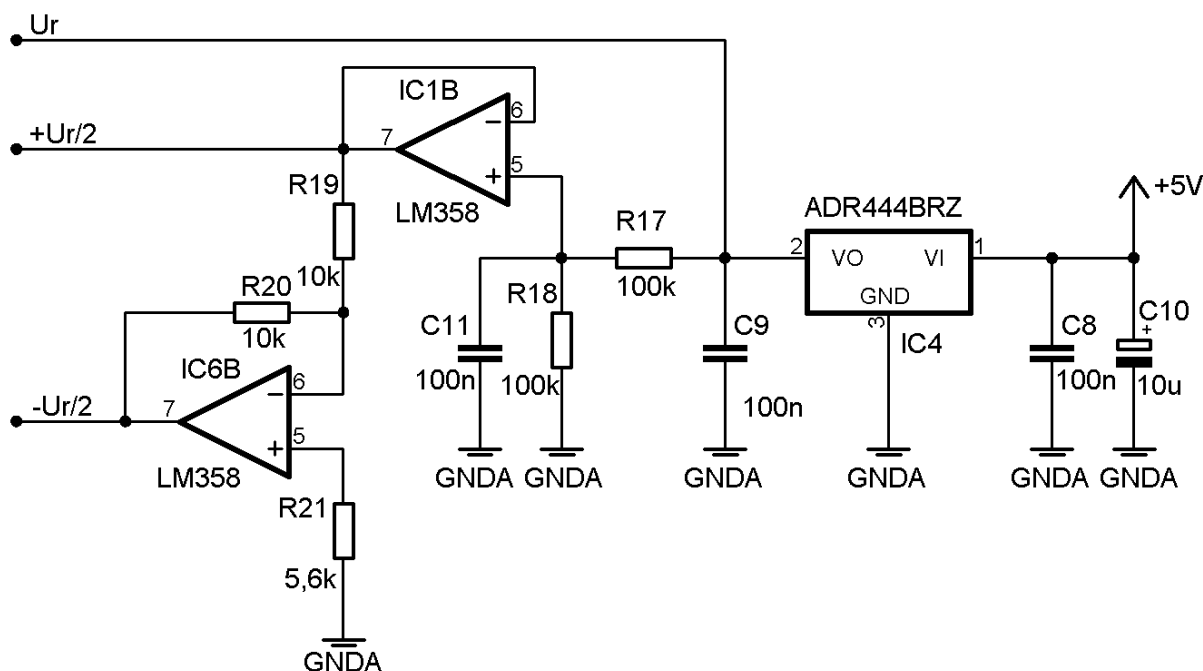
Prvo točko kalibracije toka ($0\ \text{mA}$) dobimo tako, da vir postavimo v napetostni način delovanja z izhodno napetostjo $0\ \text{V}$ (da ne dobimo odstopanj zaradi sofazne napetosti na instrumentacijskem ojačevalniku IC5 s slike 6). Izhod vira se pri tem odklopi s pomočjo releja v stikalnem delu. Tako dobimo na upor za merjenje toka (R1 na sliki 6) padec $0\ \text{V}$, ker preko njega ne teče noben tok. Hkrati je merilni upor postavljen na potencial mase preko napetostnega vira, kar omogoča pravilno merjenje napetostnega padca na njem.

Drugo točko kalibracije dobimo tako, da vir ponovno postavimo v napetostni način delovanja, vendar z neko določeno pozitivno napetostjo na izhodu. Nato na izhod preko releja stikalnega dela priklopimo tokovno referenco, ki deluje kot ponor toka. V tem primeru steče preko merilnega upora R1 (slika 6) referenčni tok, katerega vrednost izmerimo. Dovolj velika pozitivna napetost na izhodu vira je potrebna zaradi pravilnega delovanja tokovne reference (ponora).

Kalibracija tokovnega vira je analogna tisti pri napetostnem viru. Tok na izhodu tokovnega vira nastavimo na največjo in na najmanjšo možno vrednost ter pri kratko sklenjenem izhodu vira (kar storimo z relejem v stikalnem delu) merimo izhodni tok preko že umerjene merilne veje. Odmik od ničelne lege določimo z merjenjem izhodnega toka pri srednji vrednosti na DA pretvorniku. S temi podatki izračunamo, koliko toka predstavlja en kvant DA pretvornika in kolikšen je premik izhodnega toka vira.

2.4 Generator referenčnih napetosti

Glavni element tega dela naprave je precizijska napetostna referenca ADR444BRZ nazivne napetosti 4,096 V [21]. Odlikuje jo nizka začetna toleranca (0,04 %) in nizek koeficient termične odvisnosti izhodne napetosti (3 ppm/°C). Vezavo ADR444BRZ prikazuje slika 8; le-to obdajajo trije kondenzatorji (C8, C9 in C10), ki so namenjeni stabilizaciji in filtriranju motenj.



Slika 8: Generator referenčnih napetosti.

Funkcija tega sklopa naprave ni samo generiranje precizne vrednosti napetosti (U_r), temveč tudi generiranje približno polovične napetosti reference, tako pozitivne ($+U_r/2$), kot tudi negativne ($-U_r/2$). Ti dve napetosti sta potrebni pri pretvarjanju unipolarne vhodne reference iz DA pretvornika v bipolarno in pri obratni pretvorbi iz bipolarnega v unipolarni signal pri AD pretvorniku. Ti dve napetosti nista precizijski, ker je njuna vrednost odvisna od napetostnih premikov operacijskih ojačevalnikov in toleranc uporov. Njuni napaki se programsko kompenzirata pri kalibraciji, kjer se izkazujeta kot premik izhodnih veličin virov A in B.

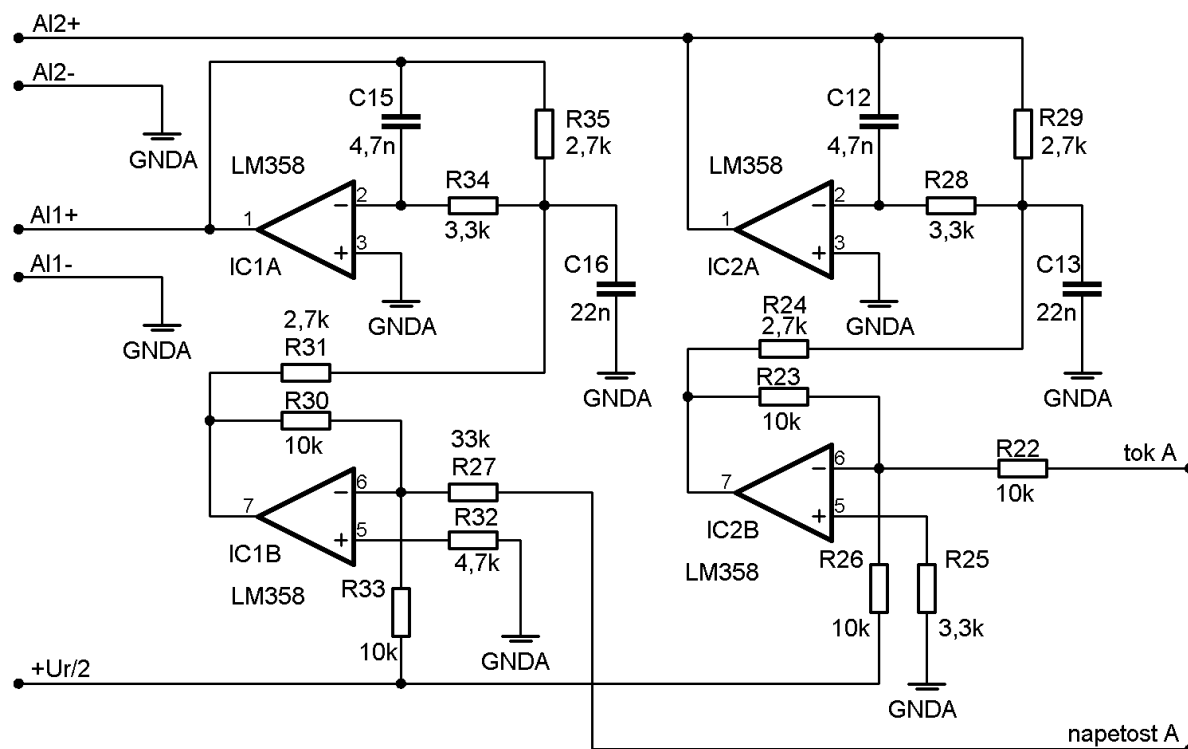
Pozitivno napetost $+U_r/2$ dobimo z delilnikom napetosti, ki ga tvorita upora R17 in R18. Da se ta napetost ne bi spreminjala s spreminjanjem izhodnega toka reference, smo jo od ostalega vezja ločili z napetostnim sledilnikom IC1B.

Negativno napetost $-U_r/2$ dobimo tako, da vodimo $+U_r/2$ preko invertirajočega ojačevalnika IC6B s spremljajočima elementoma R19 in R20. Taka vezava že sama po sebi nudi večjo stabilnost napetosti $-U_r/2$, ker izhod invertirajočega ojačevalnika izkazuje nizko impedanco. Upor R21 je namenjen zmanjšanju vpliva vhodnega mirovnega toka operacijskega ojačevalnika. Da bi upor to funkcijo čim bolje opravljal, mora biti njegova upornost enaka skupni upornosti, ki jo operacijski ojačevalnik IC6B občuti na invertirajoči sponki.

Naprava vsebuje dva opisana sklopa; vsak vir ima svoj generator referenčnih napetosti. Lahko bi sicer uporabili en generator za oba vira, vendar smo se zaradi lažjega povezovanja elementov na tiskanem vezju odločili za dva. Dodatna prednost te izvedbe so tudi krajše povezave referenčnih napetosti, kar je pomembno pri ohranjanju preciznosti.

2.5 Merilni del

Preden analogni signal napetosti oziroma toka vzorčimo z AD pretvornikom, ga je potrebno primerno analogno obdelati. Ker so izhodne veličine vira bipolarne, niso primerne za neposredno priključitev na AD pretvornik. Da bi te veličine pretvorili v unipolarne, smo uporabili obraten postopek kot pri pridobivanju bipolarne referenčne napetosti iz unipolarnega izhoda DA pretvornika.



Slika 9: Analogni vmesnik merilnika toka in napetosti (vir A).

Da bi signal spremenili v unipolarnega, smo vhodnim napetostim na sponkah *tok A* in *napetost A* prišteli približno napetost 2,048 V ($+U_r/2$) s pomočjo operacijskih ojačevalnikov IC1B in IC2B (slika 9). Pri merjenju toka je tako dobljena napetost že primerna za AD pretvorbo, saj vezje zagotavlja maksimalen razpon vhodnih napetosti od -2 V do +2 V znotraj območja veljavnih tokov vira. Pri merjenju napetosti je potrebno vhodno napetost še oslabiti za faktor ojačenja napetostnega vira, ki znaša približno 4,3.

Poleg prilagoditve napetostnih nivojev je pomembno tudi ustrezno filtriranje zajetih signalov. Delta-sigma arhitektura uporabljenega AD pretvornika ADS1211 je v obziru potrebnega filtriranja za preprečevanje prekrivanja frekvenčnih spektrov precej manj zahtevna od ostalih AD arhitektur. Vzrok za to je vzorčenje vhodnega signala pri veliko večji frekvenci, kot je dejanska frekvenca zajemanja podatkov. S tem pridobimo širok pas med Nyquistovo frekvenco in maksimalno frekvenco zajema podatkov, katerega lahko izločimo z manj ostrim nizkoprepustnim filtrom. K filtriranju motenj še dodatno pripomore digitalni filter s povprečenjem, ki ga uporabljeni AD pretvornik vsebuje.

Za analogno filtriranje signala smo uporabili analogni nizkoprepustni Butterworth-ov filter 2. reda (slabljenje 40 dB/dekado) z mejno frekvenco 100 Hz, izveden v MFB konfiguraciji (Multiple feedback, večkratna povratna zanka). Oba filtra (za tok ni napetost) tvorita operacijska ojačevalnika IC1A in IC2A, skupaj z elementi R31, R34, R35, C16, C15, R24, R28, R29, C12 in C13. Vrednosti elementov smo določili s pomočjo programskega paketa FilterLab, ki je na spletni strani podjetja Microchip na voljo brezplačno [22]. Za MFB konfiguracijo smo se odločili, ker omogoča ojačenje 1 pri enosmerni komponenti signala in zaradi lastnosti invertiranja signala, ki smo jo v vezju potrebovali. Opisani sklop je enak pri virih A in B.

2.6 Stikalni del

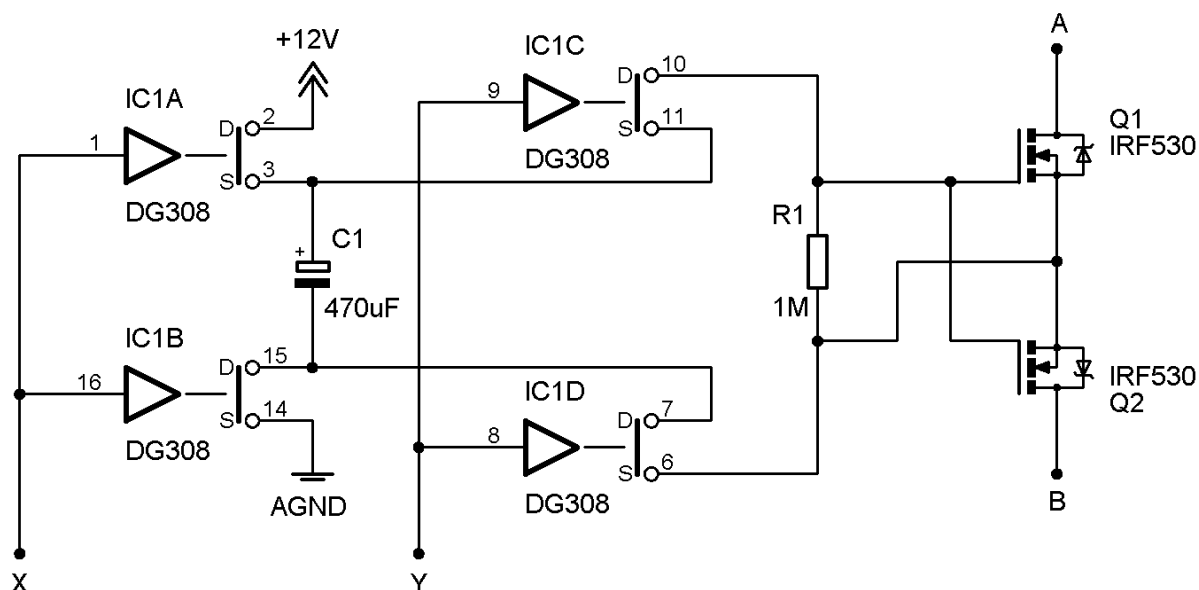
Stikalni del ima pomembno vlogo, ker omogoča pravilno kalibracijo vezja v poljubnih pogojih na izhodnih sponkah. Hkrati zagotavlja varno vključevanje elementov, ki jih želimo testirati. Možnost odklopa posameznih virov od sponk testiranega elementa zagotavlja poleg dodatne varnosti tudi pomembno funkcijo pri identifikaciji testnega elementa, saj je preko odklopa posameznih sponk omogočena identifikacija tipa spojev med dvema sosednjima sponkama v elementu (ohmska upornost, PN spoj, odprti spoj).

Tako kot večina ostalih delov je bil tudi ta tekom razvoja podvržen veliko spremembam, čemur je botrovalo predvsem dejstvo, da preko stikalnega dela tečejo nekoliko večji tokovi, kar onemogoča njegovo izvedbo v obliki integriranih analognih CMOS stikal. Kljub temu smo opravili nekaj poskusov s popolnoma elektronskimi močnostnimi stikali, ki smo si jih sami zamislili.

Prva možnost, ki bi temeljila na izgradnji analognega CMOS stikala z diskretnimi elementi, se je izkazala za neuresničljivo, saj na tržišču ni mogoče nabaviti močnostnih MOSFET tranzistorjev z od zunaj dosegljivo sponko substrata. Brez dostopa do te sponke je nemogoče napraviti CMOS stikalo, ki bi delovalo po principu integriranih stikal nizkih moči.

Naslednji korak je bil iskanje vezij, ki bi bila aplikaciji primerna, vsebovala pa bi dobavljive močnostne MOSFET tranzistorje. Ta naloga se je izkazala za precej težjo, kot smo na začetku predvidevali, predvsem zaradi strogih zahtev, katerim bi bilo tako stikalo podvrženo v MSP sistemu. Kot najbolj omejujoča se je pokazala zahteva po bipolarnem delovanju, saj bi morale zaradi bipolarnih izhodov virov v sistemu stikalo zapirati oziroma prevajati tako negativne, kot tudi pozitivne tokove. Močnostni MOSFET tranzistorji imajo že tovarniško vdelano diodo med ponorom in izvorom, zato v nasprotni smeri ne morejo zapreti toka. Problem smo poskušali rešiti z različnimi vezavami, toda tiste, ki so rešile problem bipolarnega delovanja, niso zagotavljale preciznosti – stikalo namreč ne sme imeti previsoke ohmske upornosti, še manj dodatnih nelinearnih padcev napetosti.

Delno rešitev problema smo uspeli najti v posebni verziji vezja, ki se danes uporablja pri polprevodniških relejih [24]. Ker je bil eden izmed izhodiščnih ciljev tudi cenenost naprave, smo se dejanski uporabi polprevodniških relejev odpovedali prav zaradi njihove razmeroma visoke cene. Gradnja takega releja z diskretnimi elementi ni enostavna, saj komercialne različice vsebujejo polprevodniške fotovoltaične celice, ki zagotavljajo proženje vrat izhodnih močnostnih MOSFET tranzistorjev ob svetlobnem vzburjanju. Rešitev s fotovoltaično celico je dobra, ker nudi galvansko ločitev krmiljenja od močnostnega dela, ki pri takem vezju nima samo varnostnega, temveč tudi funkcionalni pomen. MOSFET tranzistorja se namreč odpreta v primeru, ko imata med sponkama vrat in izvora napetost, večjo od napetosti odprtja kanala. Ker je napetost med ponoroma obeh MOSFET-ov spremenljiva, ne moremo zagotoviti napetosti odprtja kanala, dokler ni ta galvansko ločena od krmiljenega tokokroga. Z namenom, da bi dosegli zahtevano galvansko ločitev, smo prišli do rešitve z uporabo bilateralnih CMOS stikal. Shema takega vezja prikazuje slika 10.



Slika 10: MOSFET stikalo kot izpeljanka polprevodniškega releja.

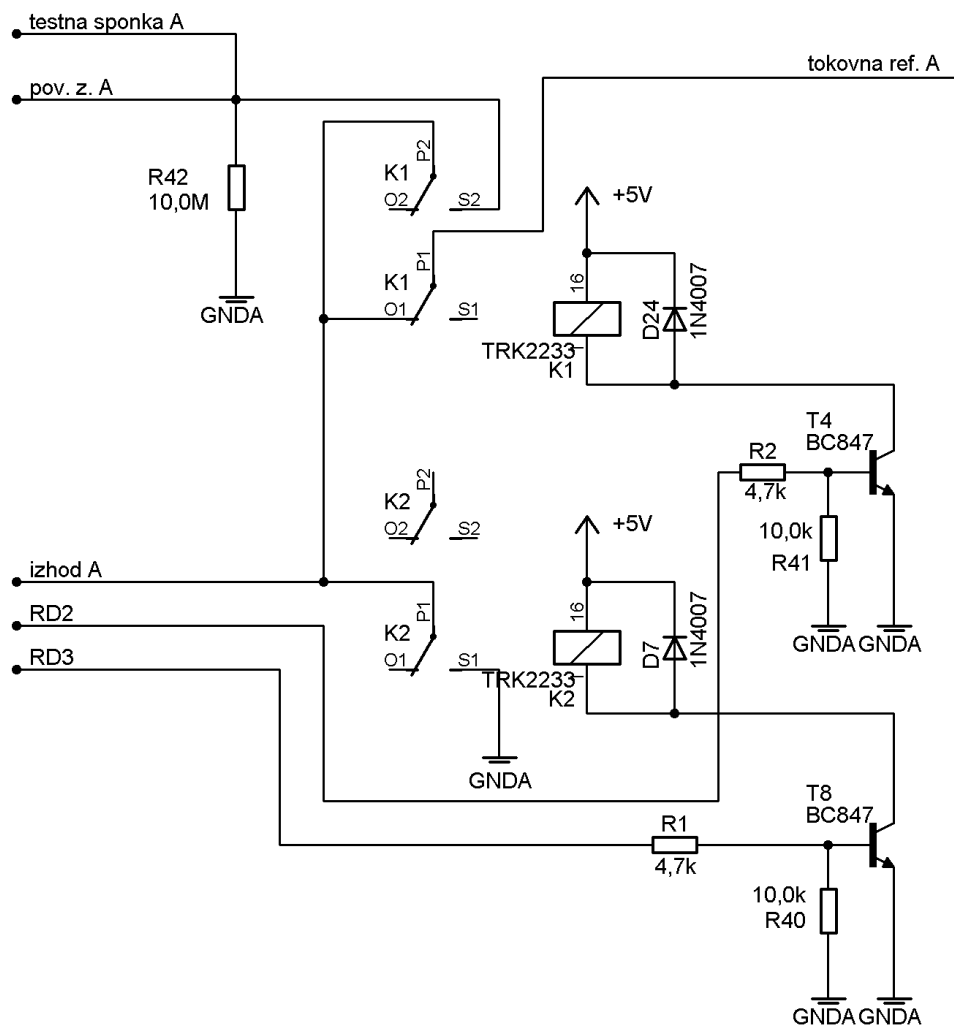
Kadar stikalo ni sklenjeno, se kondenzator C1 polni preko dveh CMOS stikal (IC1A in IC1B) na napajalno napetost +12 V. Ko želimo stikalo skleniti, postavimo linijo X v stanje logična 0, linijo Y pa v stanje logična 1. CMOS stikali IC1A in IC1B se razkleneta in tako galvanjsko ločita nabiti kondenzator C1 od vira, hkrati pa stikali IC1C in IC1D ta kondenzator skleneta z močnostnima MOSFET-oma Q1 in Q2 med sponki vrat in ponora, kar povzroči prevajanje obeh MOSFET-ov. Ker sta MOSFET tranzistorja vezana vzporedno, dobimo kakovostno stikalo z nizko „kontaktno“ upornostjo, ki je enaka zgolj vsoti upornosti kanalov obeh tranzistorjev.

Izklop stikala poteka tako, da krmilni liniji X in Y negiramo – X postavimo v stanje logična 1, Y pa v stanje logične 0. CMOS stikali IC1C in IC1D tedaj ločita kondenzator C1 od izhodnih tranzistorjev Q1 in Q2, hkrati pa ga preostali dve stikali IC1A in IC1B zopet skleneta z virom, da se napolni za nov vklop. Da bi se tranzistorja Q1 in Q2 dejansko zaprla, je med njunima sponkama vrat in izvora vezan upor R1 visoke vrednosti (1 M Ω), ki odstrani naboj z vrat in tako zapre kanal. Brez tega upora bi ostala MOSFET tranzistorja odprta za nedoločen čas, saj bi se vrata znašla na nedoločenem potencialu, odvisnem tudi od napetosti na sponkah stikala.

Omenjeno polprevodniško stikalo se je v praksi izkazalo za zelo učinkovito, kadar sta obe njegovi sponki postavljeni na znan potencial, manjši od napajalne napetosti krmilnih analognih CMOS stikal. To je logična posledica izvedbe, saj pri višjih napetostih na sponkah CMOS bilateralna stikala ne delujejo več pravilno, zato se poruši galvanska ločitev med tranzistorjema in virom. Omenjena slabost je sicer nepomembna pri aplikaciji, ko mora stikalo kratko skleniti izhod tokovnega vira ob kalibraciji, saj sta potenciala na obeh sponkah stikala znana. Napetost v tem primeru prav tako ne more prekoračiti napajalne napetosti CMOS stikal, ker je iz istega vira napajan tudi merilni vir. Ker v primeru sistema MSP potrebujemo tudi stikalo, ki loči vir od testiranega elementa, te rešitve nismo mogli uporabiti, saj je v veliko primerih potencial ene sponke stikala nedoločen (če npr. elementa ni v sistemu, ali če element izkazuje visoko upornost med svojo sponko in maso).

Potrebno napetost za sklenitev stikala zagotavlja kondenzator, zato je čas sklenjenosti omejen. Kondenzator se preko MOSFET tranzistorjev zaradi njunih visokih vhodnih upornosti praktično ne prazni, zato pa pride do izraza lastnost samopraznjenja kondenzatorja, kateri se pridruži še praznjenje kondenzatorja preko upora R1 med vrati in izvoroma. V praksi je bil ta čas zadovoljivo dolg, ker je imel uporabljeni kondenzator kapacitivnost 470 μF , zato ta omejitev pri naši aplikaciji ne bi vplivala na uporabnost vezja.

Glede na to, da dvojce od štirih stikal v vezju nismo mogli zamenjati s polprevodniškimi, smo se odločili, da bomo vsa izvedli v obliki običajnih relejev. Ta rešitev je enostavna, cenena in hkrati zagotavlja tudi zanesljivo delovanje. Kontaktna upornost relejev se sicer s časom in obrabo precej spreminja, toda temu problemu smo se pri merilnem sistemu MSP izognili z uporabo napetostne povratne zanke, sklenjene preko stikala, neposredno na merjeni element. Na ta način se izognemo napaki, ki bi se pojavila zaradi merjenja vsote padca napetosti na kontaktni upornosti in dejanske napetosti na izhodu vezja. Ker je pri kalibraciji potrebno uporabljati napetostni vir tudi pri odprtem releju (pri merjenju skrajnih napetosti vira), sta za napetostni vir na voljo dve povratni zanki: ena pred relejem in druga za relejem. Preklop med njima omogočata CMOS bilateralni stikali IC2C in IC2B s slike 6. Shemo stikalnega dela prikazuje slika 11.



Slika 11: Shema stikalnega dela (vir A).

Stikalni del sestavljata 2 releja (K1 in K2) z dvema preklopnima kontaktoma. Rele K2 se uporablja za kratko sklenitev izhoda vira z maso pri kalibraciji tokovnega vira. Funkcija releja K1 je priklop oziroma odklop vira od merjenega elementa. Poleg tega nam drugi kontakt releja K1 omogoča, da se ob sklenitvi izhoda vira z merjenim elementom odklopi referenčni tokovni vir. To sicer ni nujno, vendar dodatno zagotavlja boljšo ločitev referenčnega vira od testirane naprave takrat, ko ga ne potrebujemo. Navitji relejev prožimo preko digitalnih linij s pomočjo tranzistorjev T4 in T8 (BC847). Diodi D7 in D24 (SM4007) preprečujeta povratne sunke inducirane napetosti iz navitij relejev, ki bi sicer lahko uničili tranzistorja T4 in T8. Upor R42 pomaga odstraniti morebitni naboj z vrat testiranih MOSFET-ov, kadar le-te niso sklenjene z virom.

Vsak vir sistema MSP je opremljen s svojim stikalnim delom. Oba sta si popolnoma enaka.

2.7 Pregled vseh krmilnih in merilnih signalov

V napravi MSP se poleg do sedaj naštetih signalov, povezanih z virom A, nahajajo še signali vira B. Vse digitalne signale, tako vira A, kot B, smo zaradi preglednosti združil v tabelo 1.

PIC sponka	oznaka v shemi	funkcija	dodatno negiranje
RA0	DB1	vir B, vklop kalibracijske napetosti $U = 4,096 \text{ V}$	da
RA1	DB2	vir B, vklop kalibracijske napetosti $U = 0 \text{ V}$	da
RA2	DB3	vir B, sklenitev notranje napetostne povratne zanke	da
RA3	DB4	vir B, sklenitev zunanje napetostne povratne zanke	da
RA4	DB5	vir B, sklenitev tokovne povratne zanke	da
RA5	DB6	vir B, sklenitev napetostne povratne zanke	da
RE0	DB7	vir B, vklop omejevalnika izhodne napetosti	da
RE1	DA1	vir A, sklenitev tokovne povratne zanke	da
RE2	DA2	vir A, sklenitev napetostne povratne zanke	da
RC0	DA3	vir A, vklop omejevalnika izhodne napetosti	da
RC1	DA4	vir A, sklenitev zunanje napetostne povratne zanke	da
RC2	DA5	vir A, sklenitev notranje napetostne povratne zanke	da
RD0	DA6	vir A, vklop kalibracijske napetosti $U = 0 \text{ V}$	da
RD1	DA7	vir A, vklop kalibracijske napetosti $U = 4,096 \text{ V}$	da
RD2	/	vir A, sklopitev izhoda s testiranim elementom	/
RD3	/	Vir A, sklenitev kratkega stika na izhodu vira	/
RC6	/	vir A, vklop tokovne reference	da
RC7	/	SPI vodilo, linija SDO (gospodar)	/
RD4	/	linija $\overline{\text{DRDY}}$ (ADS1211)	/
RD7	/	linija $\overline{\text{LD}}$ (oba DAC7611)	/
RB0	/	SPI vodilo, linija SDI (gospodar)	/
RB1	/	SPI vodilo, linija SCK (gospodar)	/
RB2	/	linija $\overline{\text{CS}}$ (ADS1211)	/
RB3	/	linija $\overline{\text{CS}}$ (DAC7611 – vir B)	/
RB4	/	linija $\overline{\text{CS}}$ (DAC7611 – vir A)	/
RB5	/	vir B, vklop tokovne reference	da
RB6	/	vir B, sklenitev kratkega stika na izhodu vira	/
RB7	/	vir B, sklopitev izhoda s testiranim elementom	/

Tabela 1: Pregled digitalnih signalov v sistemu MSP.

Poleg naštetih digitalnih signalov so v vezju pomembni še štirje analogni signali, ki vstopajo v AD pretvornik – signali napetosti in tokov vira A in B. Natančen položaj teh signalov v vezju za uporabnika oziroma programerja naprave ni pomemben, v tabeli 2 pa se nahajajo potrebne informacije o tem, na katerem kanalu AD pretvornika ADS1211 odčitamo posamezne električne veličine.

vhodni kanal ADS1211	merjena veličina
AIN1	izhodna napetost vira A
AIN2	izhodni tok vira A
AIN3	izhodna napetost vira B
AIN4	izhodni tok vira B

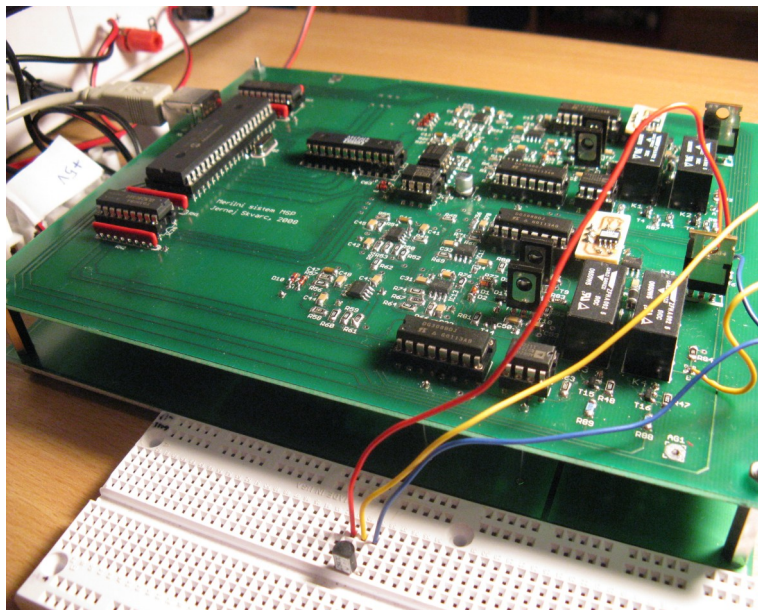
Tabela 2: Priklop analognih signalov na AD pretvornik.

2.8 *Praktična izvedba sistema MSP*

Med razvojem je bil celoten sistem zaradi možnosti hitrega prilagajanja vezja sestavljen na štirih prototipnih ploščah. Ko smo dobili končno vezje, ki je zadostovalo ciljem, smo celoten sistem izvedli na tiskanem vezju.

Tiskano vezje je pri tej aplikaciji pomemben del sistema. Pri njegovem načrtovanju smo morali biti pozorni na morebitne napake, ki bi lahko ogrozile pravilno delovanje sistema oziroma slabšale kakovost merjenja.

V merilnem sistemu MSP najdemo tako analogne, kot digitalne signale. Naša naloga pri načrtovanju tiskanega vezja je bila, da s pravilno razporeditvijo elementov in premišljenim postavljanjem vodnikov na tiskanem vezju preprečimo morebitne vplive hitrih digitalnih signalov na občutljive analogne signale. Slika 12 prikazuje fotografijo tiskanega vezja, na kateri so razvidni ukrepi, katere smo v ta namen uporabili.

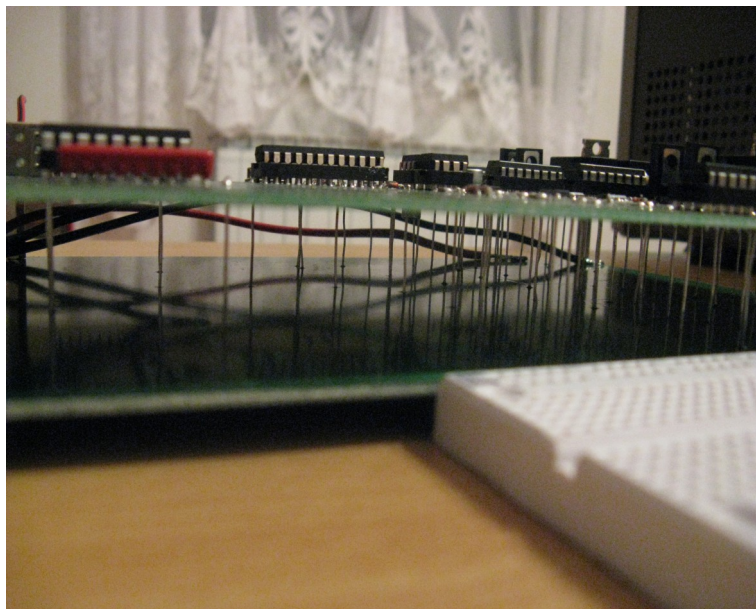


Slika 12: Merilni sistem MSP na tiskanem vezju.

Na levi strani tiskanega vezja je mikroprocesorski del (mikrokrmilnik PIC 18F4550 in pretvorniki iz 5 V logike na 12 V logiko). Na sredini se nahajajo integrirana vezja, v katerih najdemo tako digitalne, kot tudi analogne signale (ADS1211 in DAC7611). Desna stran vezja je analogni merilni del. Na prototipni plošči spodaj vidimo bipolarni tranzistor, ki je priključen na merilni sistem MSP preko treh žic. Taka razporeditev elementov nam omogoča, da je občutljivi analogni del sistema dovolj oddaljen od digitalnega, s čemer ustrezno zmanjšamo sklopitev motenj po kapacitivni ali induktivni poti.

Sistem je sestavljen iz dveh dvoslojnih plošč. Zgornji sloj zgornje plošče je dejansko vezje, spodnji sloj iste plošče pa sta dve masni ploskvi – ena digitalna, druga analogna. Obe sta povezani skupaj v eni skupni točki in priključeni na usmernik. Pri masnih ploskvah smo poskrbeli, da imata čim manj prekinitev, zato je na njiju le nekaj elementov in malo kratkih povezav. Pod operacijskimi ojačevalniki je masna ploskev odstranjena, ker bi parazitna kapacitivnost med njo in izhodom ojačevalnika ter njegovim invertirajočim vhodom povzročila nestabilnost slednjega.

Spodnja plošča nima nobenega elementa, temveč služi kvalitetnemu napajanju vezja. Na njej so le ploskve z vsemi napajalnimi napetostmi (+5, +12 in -12 V), ki jih vodimo do zgornjega vezja preko navpičnih povezav (slika 13).



Slika 13: Navpične povezave med napajalnimi ploskvami spodnje plošče in vezjem na zgornji plošči.

Taka izvedba nudi nizko impedanco napajalnih vodov, kar je ugodno pri preprečevanju nihanja napajalnih napetosti kot posledico nihanja napajalnega toka. Dodatna prednost opisane konstrukcije je manjše število potrebnih povezav na zgornji plošči. Te povezave bi morale potekati po masnih ploskvah zgornje plošče, kar bi pomenilo dodatne prekinitve masnih ploskev in s tem zmanjševanje njihovih pozitivnih učinkov.

2.9 Programski del

Programski del sistema MSP je sestavljen iz treh delov. Prvi del je eProDas programska oprema, ki obsega gonilnik in API za USB komunikacijo z mikrokrmilnikom.

Drugi del sta dve konzolni aplikaciji za operacijski sistem MS Windows, ki omogočata vse osnovne funkcije merjenja in identifikacije elementov. Obe aplikaciji sta napisani v programskem jeziku Delphi, za katerega smo se odločili zaradi enostavnosti izdelave grafičnega uporabniškega vmesnika. Kljub temu se je izkazalo, da ne bi bilo smiselno izdelati lastnega grafičnega vmesnika v splošnonamenskem programskem jeziku, ker obstajajo v ta namen bolj uporabni programi, ki omogočajo tudi vsakovrstno analizo dobljenih meritev (npr. MATLAB, LabView, ...). Ker je bil projekt na tem mestu že v pozni fazi razvoja, ne bi bilo smotno kode pretvarjati v katerega izmed drugih jezikov, zato smo aplikaciji dokončali v Delphiju in ju prilagodili uporabi v zunanjem grafičnem vmesniku.

Tretji del programske opreme je uporabniški vmesnik. Zaradi enostavnosti in fleksibilnosti smo ga razvili v programskem paketu MATLAB. Zgrajen je v obliki tako imenovanih „M – skript“, ki vsebujejo funkcije, napisane v posebnem programskem jeziku paketa MATLAB (programi v tem jeziku se izvajajo preko tolmača).

Obe omenjeni aplikaciji (za merjenje in identifikacijo), uporabljata za svoje delovanje knjižnici hardware.pas in MSP.pas. Prva vsebuje vse potrebne funkcije za krmiljenje strojne opreme MSP in za merjenje. Napisana je s pomočjo objektnega programskega jezika Pascal (Delphi). Celotna datoteka vsebuje en razred, imenovan TVir, ki tvori programerju prijazen programski vmesnik. Razred sestavljajo funkcije, ki bi jih v primeru klasičnega instrumenta videli na prednji plošči: inicializacija sistema, aktivacija posameznih izhodov, kalibracija, nastavitve izhodnih napetosti in tokov, merjenje izhodnih napetosti in tokov, nastavitve omejitve izhodne napetosti, kratka sklenitev izhodnih sponk.

Druga knjižnica, MSP.pas, je napisana v istem programskem jeziku. Vsebuje 3 razrede: TVhodni_podatki, TIzmerjeni_podatki in TTester. TVhodni_podatki in TIzhodni_podatki sta razreda, ki omogočata ustvarjanje polja podatkov z dinamično velikostjo v delovnem pomnilniku osebnega računalnika in uporabniku prijazen dostop do elementov tega polja. Polje razreda TVhodni_podatki se uporablja za shranjevanje niza želenih vrednosti vzbujevalnih tokov in napetosti, ki se jih v postopku merjenja pošilja sistemu MSP. TIzhodni_podatki je namenjen shranjevanju izmerjenih tokov in napetosti, ki so posledica

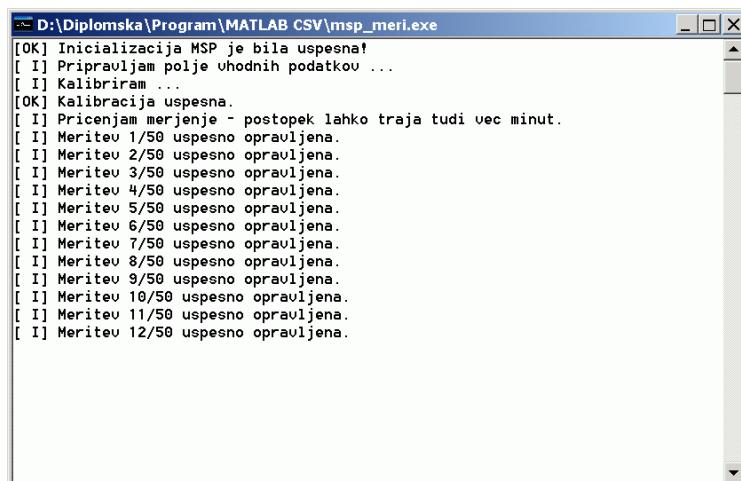
prej omenjenega vzbujanja. Vsak element opisanih polj predstavlja eno točko na grafu karakteristike elementa. Objekti, ki so izpeljani iz teh dveh razredov, se uporabljajo kot parametri funkcije, namenjene merjenju karakteristike elementa.

TTester je vrhnji razred, ki predstavlja eksperiment nad polprevodniškim elementom. Vsebuje tri metode: `Opravi_meritve`, `Device_Ident` in `Isci_spoje`. Metoda `Opravi_meritve` opravi merjenje karakteristike oziroma ene krivulje na karakteristiki (pri merjenju polja karakteristik je potrebno za vsako izrisano krivuljo polja posebej klicati omenjeno metodo, vmes pa poskrbeti za spremembo opazovanega parametra polja).

`Device_Ident` je metoda, ki identificira vstavljeni element. `Isci_spoje` je njena pomožna metoda, zato slednje uporabniku ni potrebno posebej klicati. Naloga metode `Isci_spoje` je analiza sponk vstavljenega elementa v tem smislu, da najde vrsto spoja med njimi (polprevodniški spoj, ohmska upornost, odprte sponke). Preko te metode dobljene podatke uporabi `Device_Ident` za odločanje, katere dodatne teste se bo izvedlo na vstavljenem elementu, če je tip vstavljenega elementa kljub zbranim podatkom še vedno nemogoče pravilno določiti.

2.9.1 Merilna aplikacija

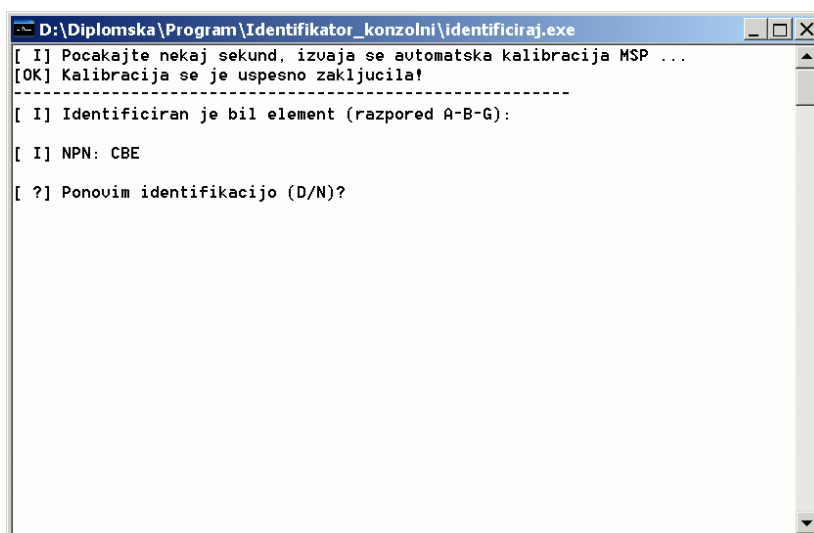
Merilna aplikacija (z imenom `msh_meri.exe`) omogoča avtomatizirano merjenje karakteristik polprevodniških elementov. Njeno delo je pretvorba vrednosti želenih izhodnih tokov in napetosti v dejanske izhodne tokove in napetosti posameznega vira A in B sistema MSP. Po vsaki nastavitvi izhodnih veličin sledi še meritev njihovih dejanskih vrednosti (tok in napetost). Vhodni podatki (želene napetosti in tokovi) se v program vnašajo preko datoteke v formatu CSV (ang.: comma separated values), kjer vsaka vrstica predstavlja eno serijo meritev. Serija je definirana z začetnimi in končnimi vrednostmi želenih izhodnih veličin, številom vmesnih vrednosti in želenim načinom vzbujanja elementa (napetostni, tokovni). Pogled na okno aplikacije med merjenjem prikazuje slika 14.



Slika 14: okno aplikacije MSP_meri.exe.

2.9.2 Aplikacija identifikacije elementov

Aplikacija identifikacije elementov je ravno tako kot merilna aplikacija izvedena v obliki konzolne MS Windows aplikacije (msp_identificiraj.exe), napisane v programskem jeziku Delphi. Aplikacija praktično ne potrebuje zapletenega uporabniškega vmesnika, saj takoj po zagonu opravi vse potrebne teste na vstavljenem elementu in izpiše tip elementa ter razpored njegovih priključnih sponk, kot prikazuje slika 15.



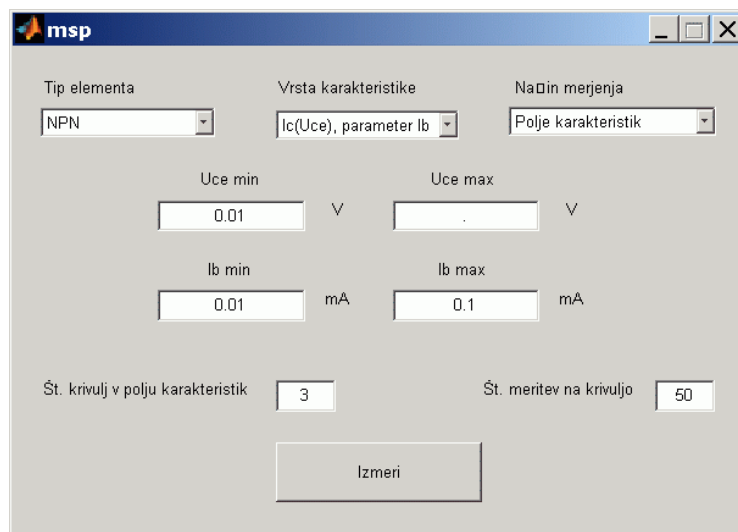
Slika 15: Aplikacija za identifikacijo elementov.

Na sliki 15 vidimo, da je vstavljeni element NPN tranzistor, katerega razpored sponk je CBE (razpored velja pri zaporedju merilnih sponk sistema MSP A, B in G). Po opravljeni identifikaciji se izpiše vprašanje „Ponovim identifikacijo (D/N)?“. Če nanj odgovorimo z „d“, se bo opravila nova identifikacija, odgovor „n“ pa izbere izhod iz programa.

2.9.3 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik je namenjen enostavnemu in preglednemu prikazu meritev na zaslonu osebnega računalnika. Zaradi enostavnosti in fleksibilnosti smo se odločili za uporabo programskega paketa MATLAB za MS Windows verzije 7.0. Ta paket ima široke možnosti shranjevanja, obdelave in prikaza podatkov. Vsebuje vse potrebne funkcije za izris preglednega grafa karakteristike oziroma polja karakteristik in vključuje bogat skriptni jezik, v katerem je možno grafe in ostale vgrajene grafične elemente razširiti z dodatnimi uporabniškimi izbirami. Z njegovo pomočjo smo poleg grafa napravili tudi pogovorno okno, v katerem nastavimo vse želene parametre merjenja in sam postopek merjenja sprožimo.

Uporabniški vmesnik zaženemo v MATLAB-ovi ukazni vrstici z ukazom „msp“. Ob tem se nam odpre pogovorno okno, kakršnega vidimo na sliki 16.



Slika 16: Pogovorno okno merilnega sistema MSP.

Pogovorno okno vsebuje na vrhu tri padajoče menije. „Tip elementa“ nam nudi izbiro

elementa, katerega karakteristiko želimo izmeriti, „Vrsta karakteristike“ omogoča izbiranje tipa karakteristike, ki jo želimo izmeriti in „Način merjenja“ določa enega izmed treh možnih potekov meritev:

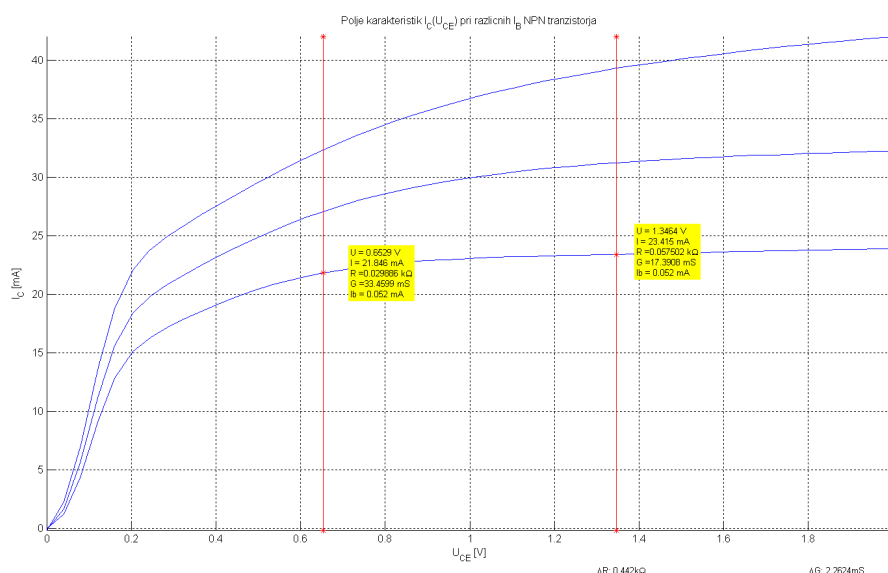
1. polje karakteristik: običajno merjenje ene karakteristike (dvopolni elementi) oziroma polja karakteristik (tripolni elementi)
2. primerjava elementov: merjenje karakteristik več elementov istega tipa, za primerjavo razpršenosti parametrov (v tem načinu merjenja ponuja grafični vmesnik možnost pregleda maksimalnih in minimalnih vrednosti v poljubni točki izmerjenih karakteristik)
3. vpliv temperature: merjenje več karakteristik, izmerjenih pri različnih zunanjih pogojih (na primer pri različnih temperaturah elementa). Pri tem načinu merjenja je možno izmeriti samo do štiri krivulje, ker se zaradi preglednosti vsaka obarva s svojo barvo (tako lahko uporabnik enostavno vidi, kakšno spremembo je dejansko sprožila sprememba opazovanega parametra).

Kadar nastavimo drugo ali tretjo vrsto eksperimenta, je onemogočeno merjenje celotnega polja karakteristik, zato je možno le merjenje posameznih krivulj. Za tak način delovanja smo se odločili zaradi večje preglednosti grafa in zato, ker je programsko lažje izvesti izpis razlike med karakteristikami v izbrani točki, če imamo vse karakteristike izmerjene pri samo eni vrednosti parametra. Pri merjenju posameznih karakteristik se za vrednost parametra vedno privzame njegova minimalna vrednost v vpisnem okencu programa.

V grafičnem vmesniku najdemo šest vpisnih okenc. V zgornje štiri vpišemo minimalne in maksimalne vrednost vzbujevalnih veličin in parametra (pri merjenju polja karakteristik). Katere so te veličine in kakšno enoto imajo, nam program sam izpiše po nastavitvi ustreznega elementa in tipa karakteristike, ki jo želimo izmeriti. Zadnji dve okenci določata število meritev, ki jih bo sistem opravil. V okence „Št. krivulj v polju karakteristik“ vpišemo želeno

število krivulj v grafu enega polja, v okence „Št. meritev na krivuljo“ pa vpišemo, koliko meritev naj izvede sistem pri merjenju ene same krivulje. Iz tega sledi, da bo število dejansko izvedenih meritev enako produktu števil v obeh okencih.

Eksperiment prvega tipa (običajno merjenje polja karakteristik) uporabniku izriše karakteristiko ali polje karakteristik vstavljenega elementa, na njo pa nariše dva kazalca, ki sta prikazana v obliki dveh vertikalnih črt in ki ju lahko poljubno premikamo s pomočjo miške (prikaz na sliki 17).



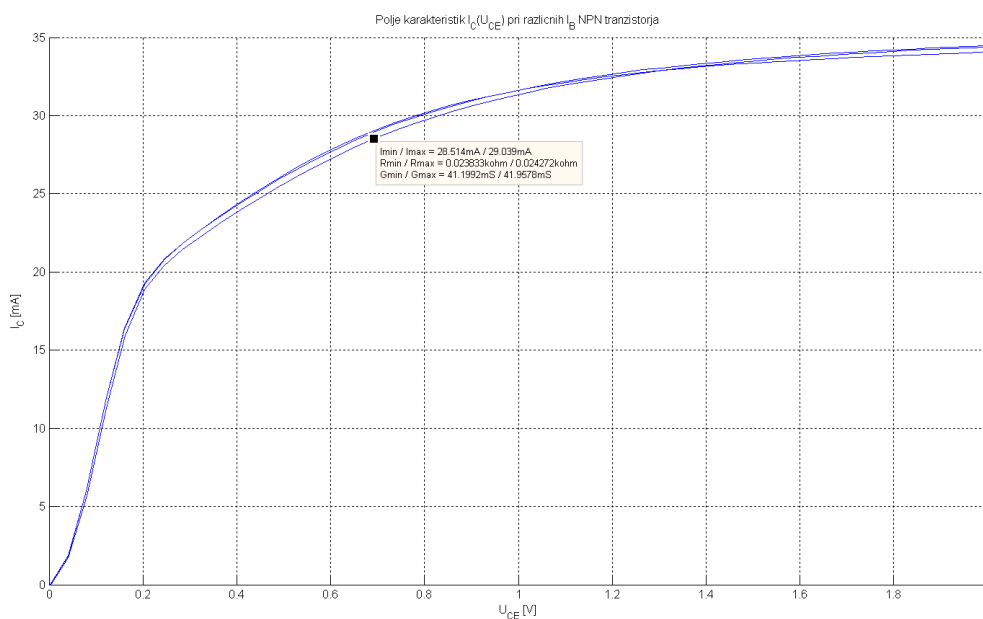
Slika 17: Graf polja karakteristik pri merjenju NPN tranzistorja.

Ob vsakem kazalcu se nahaja okence, v katerem so izpisani osnovni podatki točke na karakteristiki, kjer se kazalec trenutno nahaja: napetost U , tok I , totalna upornost R v točki, totalna prevodnost G v točki in vrednost parametra trenutno izbrane krivulje.

Kazalca prikazujeta podatke točk le ene krivulje v polju karakteristik – tiste, ki je trenutno izbrana. Če želimo opazovati vrednosti na drugi krivulji, moramo klikniti na zeleno krivuljo.

Katera krivulja je trenutno izbrana, vidimo s pomočjo zvezdice, ki se nahaja na presečišču trenutno izbrane krivulje in kazalca. Poleg merjenja totalne upornosti in prevodnosti lahko uporabnik meri tudi diferencialno upornost (ΔR) in prevodnost (ΔG) med točkama na krivulji, ki ju določata kazalca. Ta dva podatka se sproti izpisujeta pod grafom.

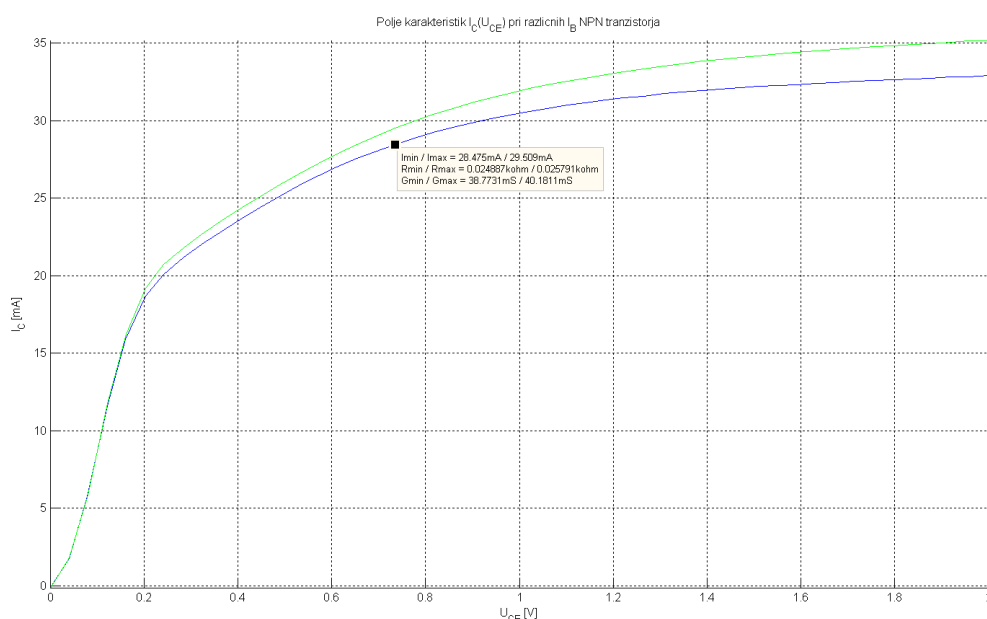
Pri eksperimentu drugega tipa je poudarek na opazovanju razlik med karakteristikami različnih primerkov elementov istega tipa. Na ta način je omogočeno opazovanje razpršenosti parametrov, kot so faktor tokovnega ojačenja pri bipolarnih tranzistorjih ali pragovna napetost vrat pri MOSFET tranzistorjih. Na grafu se izrišejo vse karakteristike, s klikom na točko ene izmed krivulj pa se odpre okence z maksimalnimi iz minimalnimi vrednostmi meritev v točki (to so napetost ali tok, totalna upornost in totalna prevodnost). Na tak način lahko uporabnik hitro vidi obseg razlik med posameznimi elementi (slika 18)



Slika 18: meritev treh primerkov NPN tranzistorjev istega tipa.

Eksperiment tretjega tipa je razvit z namenom opazovanja sprememb karakteristik polprevodniških elementov ob različnih vplivih okolja. Tu nas največkrat zanima sprememba karakteristik zaradi višanja ali nižanja temperature. Graf, ki prikazuje rezultate tega

eksperimenta je po obliki in funkcionalnosti enak grafu predhodno opisanega eksperimenta, vendar se tu po vsaki ponovitvi merjenja barva krivulj spremeni. To je pomembno zaradi kvalitativne ocene lezenja karakteristike pri določenih spremembah zunanjih pogojev. Ker je število barv omejeno, je največje možno število karakteristik na istem grafu omejeno (omejitev je postavljena na štiri karakteristike v istem grafu). Na sliki 19 je graf karakteristike NPN tranzistorja. Pri drugi meritvi smo tranzistor segreli s prsti.



Slika 19: karakteristika NPN tranzistorja pri sobni temperaturi in po ogrevanju s prsti.

Pri zadnjih dveh eksperimentih se med posameznimi merjenji na zaslonu prikaže okence, ki uporabnika vpraša za nadaljnje merjenje. Tako ima le-ta dovolj časa, da med merjenji npr. segreje element, ga zamenja z drugim, ali pa kako drugače spremeni pogoje, pri katerih se element meri.

Za pravilno merjenje elementov je pomembna njihova pravilna priključitev na merilni sistem. Kako moramo priključiti posamezne tipe elementov, prikazuje tabela 3.

tip elementa	sponke elementa	MSP sponke
FET tranzistorji	D	A
	G	B
	S	G
bipolarni tranzistorji	C	A
	B	B
	E	G
diode	A	B
	K	G

Tabela 3: Način priključitve posameznih elementov na MSP sistem

2.9.4 Pomožna testna aplikacija

Za testiranje sistema smo vzporedno s strojno opremo razvijali testno aplikacijo (vmesnik.exe), ki omogoča nastavljanje vseh sklopov merilnega sistema MSP. Videz njenega okna prikazuje slika 20. Aplikacija je napisana v programskem jeziku Delphi.

Testna aplikacija omogoča nastavljanje poljubnega toka oziroma napetosti vira A ali B, kalibracijo sistema ob poljubnem času, aktivacijo izhodov posameznih virov, njihovo kratkostičenje in omejitev izhodnih napetosti. Tekstovno okno v spodnjem delu okna aplikacije je namenjeno izpisovanju sporočil o morebitnih napakah v sistemu MSP.

Vmesnik za merilni sistem MSP

2 Nastavi U 0 Nastavi U

0 Nastavi I 0 Nastavi I

Kalibriraj

2.001 Napetost A -0.001 Napetost B

0.003 Tok A 0.000 Tok B

☐ Kratek stik A ☐ Kratek stik B

☒ Aktiviraj A ☐ Aktiviraj B

☐ Omeji A ☐ Omeji B

Slika 20: pomožna testna aplikacija vmesnik.exe.

3 Postopek identifikacije elementov

Računalniško podprti merilni sistemi imajo veliko prednost pred ostalimi v tem, da so poljubno programirljivi in zaradi tega bolj vsestranski. Ta lastnost nam je pri sistemu MSP omogočila izdelati programsko aplikacijo, ki identificira najpogostejše tipe polprevodniških elementov ter določi razpored njihovih priključnih sponk. Ker je princip grobega sortiranja elementov v različne kategorije splošen, bi lahko aplikacijo razširili tudi na druge tipe elementov, s tem da bi obstoječi kodi dodali le dodatne rutine, ki bi detajlno obdelale element, prepoznan preko splošne detekcije tipov spojev. Trenutno podprti elementi so: navadne diode, LED diode, Schottkyjeve diode, upori z nižjimi upornostmi (do 2,5 k Ω), NPN in PNP bipolarni tranzistorji, NJFET in PJFET (slednji je implementiran, ne pa tudi testiran, ker je tak element težko dobiti na tržišču) ter močnostni MOSFET z induciranim N ali P kanalom.

Identifikacija elementov predstavlja ekspertni sistem, ki oponaša človeškega merilca in njegovo prepoznavanje elementov na podlagi izmerjenih karakteristik. Postopek je pri sistemu MSP nekoliko zahtevnejši, ker smo omejeni na dva tokovno-napetostna vira. Največ težav povzroča dejstvo, da tiste sponke elementa, ki je priključena na maso, ne moremo odklopiti. To pomeni, da lahko izolirano testiramo le spoja elementa med virom A in maso ter virom B in maso, ne pa tudi spoja med viroma A in B. Mase ni moč odklopiti, ker smo se želeli na tak način izogniti dodatnim padcem napetosti na kontaktni upornosti stikala, ki običajno ni natančno poznana, in tudi ne konstantna. Padec napetosti na njej je zaradi precej velikega toka pri dani natančnosti merjenja sistema prevelik, da bi ga lahko zanemarili. Če bi želeli to pomanjkljivost sistema odpraviti, bi morali uporabiti posebne prijeme, kar bi povečalo njegovo kompleksnost in ceno. Iz teh razlogov smo se raje odločili, da pomanjkljivost strojne opreme premostimo s programskimi rešitvami.

Prepoznavanje polprevodniških spojev v sistemu MSP se vrši na podlagi njihove nelinearnosti in ne na podlagi karakteristične kolenske napetosti. Ta pristop nudi več prednosti:

- omogočeno je prepoznavanje elementov, grajenih iz praktično poljubnega polprevodniškega materiala (silicij, germanij, galijev arzenid, ...), če je kolenska napetost manjša od 2,5 V,
- prepoznavanje je bolj zanesljivo, ker so kolenske napetosti odvisne od temperature in stopnje dopiranja polprevodnika,
- prepoznavanje polprevodniškega spoja je zanesljivo tudi v primeru nižje natančnosti merjenja.

V nadaljevanju si bomo ogledali potek posameznih faz pri postopku identifikacije.

3.1 Prva faza identifikacije – prepoznavanje tipa spojev

Ena izmed prvih in najznačilnejših informacij vsakega polprevodniškega elementa je prav tip spojev med posameznimi priključnimi sponkami. Ta je lahko bodisi polprevodniški PN spoj, spoj z ohmsko upornostjo, ali spoj z zelo visoko upornostjo (odprte sponke). Kljub temu, da lahko več zelo različnih elementov poseduje enake tipe spojev, se s takim testom že na začetku identifikacije učinkovito določi, kateri koraki bodo sledili v nadaljevanju. Elemente se združuje v skupine po podobnosti spojev, kar pomeni pri nadaljnjem postopku identifikacije dodatno poenostavitev. Podatek o tem, kje se nahajajo določeni spoji, nam omogoča takšno organizacijo nadaljnjih korakov, da preprečimo morebitno poškodbo ali preobremenitev posameznega spoja.

Prepoznavanje se prične s spojem med virom A in maso. V ta namen vir B odklopimo od testiranega elementa s pomočjo stikalnega vezja in sledimo naslednjim korakom:

- vir A nastavimo kot izvor toka jakosti 1 mA,
- izmerimo napetost ($U_{1\text{mA}}$) in tok ($I_{1\text{mA}}$) na izhodu vira A (in s tem na spoju med sponko A in maso),
- vir A nastavimo kot ponor toka jakosti -1 mA ,
- izmerimo napetost ($U_{-1\text{mA}}$) in tok ($I_{-1\text{mA}}$) na izhodu vira A,
- vir A nastavimo kot izvor toka jakosti 0,5 mA,
- izmerimo napetost ($U_{0,5\text{mA}}$) in tok ($I_{0,5\text{mA}}$) na izhodu vira A,
- vir A nastavimo kot ponor toka jakosti $-0,5\text{mA}$,
- izmerimo napetost ($U_{-0,5\text{mA}}$) in tok ($I_{-0,5\text{mA}}$) na izhodu vira A.

Tako dobljenih osem meritev predstavlja osnovo za prepoznavanje tipa spoja. Za zagotavljanje zanesljive primerjave med dvema meritvama, smo uporabili absolutno vrednost relativne razlike med njima, po enačbi (1). Spremenljivki X in Y v enačbi predstavljata dve veličini, katerih medsebojno razliko (Δ_{XY}) bi radi izrazili v relativni obliki.

$$\Delta_{XY} = \left| \frac{Y - X}{X} \right| \quad (1)$$

Z vpeljavo naslednjih konstant, sestavimo praktične pogoje za določitev tipa spoja:

- $U_{\text{kolena, max}}$ – maksimalna napetost na spoju, ki se še smatra kot kolenska. Ta konstanta je potrebna, da ne bi sistem zaznal napetosti nasičenja tokovnega vira kot kolensko napetost (ker je ravno tako nelinearna glede na izhodni tok). Uporabljena vrednost je 2,5 V.

- $\Delta_{U, \max}$ – največja razlika med napetostima spoja, izmerjenima pri toku 1 mA in 0,5 mA. Ta razlika je neposredno odvisna od nelinearnosti spoja (pri linearnem ohmskem spoju je napetost pri 1 mA natanko dvakrat večja kot pri 0,5 mA, pri polprevodniškem spoju pa se le malo spremeni). Pri idealni diodi bi ta vrednost znašala $\Delta_{U, \max} = 0$, za realne polprevodniške spoje pa moramo izbrati neko večjo vrednost, ki vzame v obzir tudi majhne spremembe kolenske napetosti pri različnih vzbujevalnih tokovih. Uporabljena vrednost je 0,25 (relativno podana, po enačbi (1)).
- $\Delta_{R, \max}$ – največja razlika med upornostima, izmerjenima pri obeh različnih tokovih. To je merilo za linearnost ohmskega spoja – teoretično mora biti pri takem spoju Δ_R enak 0, vendar je zaradi pogreškov pri merjenju in drugih razlogov malo večji. Uporabljena vrednost za $\Delta_{R, \max}$ je 0,25 (relativno podana, po enačbi (1)).
- $U_{\max}$ – splošna maksimalna napetost, ki še zagotavlja pravilen rezultat merjenja. Vrednost je trenutno nastavljena na 2,5 V, vendar bi jo lahko povečali in tako razširili območje merjenja upornosti. Maksimalna upornost, ki jo sistem MSP še lahko izmeri, je neposredno odvisna od $U_{\max}$, znaša pa $R_{\max} = U_{\max} / 1 \text{ mA}$. Pri večjih upornostih je padec na upor večji od $U_{\max}$, zato pogoj za pravilno identifikacijo ni izpolnjen. Ta omejitev je zopet potrebna, da ne dobimo napačnih meritev v primeru nasičenja izhoda tokovnega vira ob priključeni preveliki upornosti.

S tako definiranimi konstantami in meritvami zapišimo pogoje za določitev tipa spoja:

- če je $\Delta(U_{1\text{mA}}, U_{0,5\text{mA}}) < \Delta_{U, \max}$, in hkrati $U_{1\text{mA}} < U_{\text{kolena, max}}$, imamo prevodno orientiran polprevodniški spoj med virom A in maso s kolensko napetostjo $U_{1\text{mA}}$;
- če je $\Delta(U_{-0,5\text{mA}}, U_{-1\text{mA}}) < \Delta_{U, \max}$, in hkrati $U_{-1\text{mA}} > -U_{\text{kolena, max}}$, imamo prevodno orientiran polprevodniški spoj med maso in virom B s kolensko napetostjo $U_{-1\text{mA}}$;

- če je $\Delta(U_{-I_{mA}} / I_{-I_{mA}}, U_{I_{mA}} / I_{I_{mA}}) < \Delta_{R, \max}$, in hkrati $U_{I_{mA}} < U_{\max}$, imamo ohmsko upornost spoja vrednosti $R = U_{I_{mA}} / I_{I_{mA}}$;
- če noben izmed zgornjih pogojev ni izpolnjen, imamo odprte sponke (spoj z visoko upornostjo).

Prepoznavanje tipa spoja med virom B in maso je popolnoma enak opisanemu postopku.

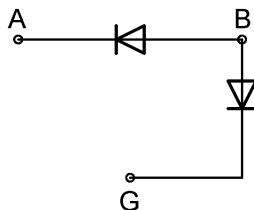
3.1.1 Identifikacija spoja A-B

Popolnoma drugi postopki so potrebni pri identifikaciji spoja med viroma A in B. Tu je nemogoče izolirati tretjo sponko elementa, ki je priključena na maso. Za identifikacijo tega spoja najprej ugotovimo, kakšne vrste spoja sta med virom A in maso ter virom B in maso, nato pa na podlagi teh dveh informacij pazimo na ustrezne napetostne potenciale izhodov vira A in B, da se izognemo vplivu ostalih dveh spojev na spoj A-B.

Problem je rešljiv, vendar ne v vseh primerih. Obstajajo namreč določene kombinacije spojev, kjer je nemogoče izolirati samo spoj A-B in se znebiti vpliva A-G in B-G (črka G označuje sponko mase). Na srečo se take kombinacije pri delujočih polprevodniških elementih ne pojavljajo, zato navzočnost take kombinacije zagotovo pomeni okvarjen element.

V nadaljevanju uporabimo shemo treh testnih sponk merilnega sistema MSP, med katerimi označimo polprevodniške spoje s simbolom diode, ohmske upornosti s simbolom upora in odprte sponke brez vrisanega simbola. Izhod vira A je dosledno označevan s črko A, izhod vira B s črko B in masa s črko G. Spoj, katerega identifikacija se izvaja, je označen s prekinjeno črto in črko X nad njo.

Na sliki 21 je predstavljen prikaz NPN tranzistorja, ki ima kolektor priključen na testno sponko A, bazo na B in emitor na G.

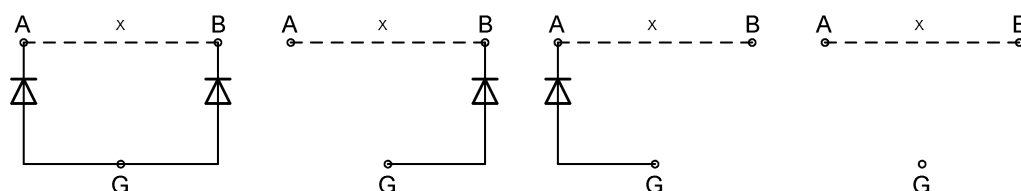


Slika 21: Shematski prikaz priklopa NPN tranzistorja na sistem MSP.
Kolektor je priključen na sponko A, baza na B in emitor na G.

Sledeče sekcije opisujejo šest skupin možnih vezav spojev testiranega elementa pri postopku identifikacije. V posamezne skupine so združene kombinacije, pri katerih tip spoja A-B identificiramo z enakim postopkom. Identifikacijski program na podlagi predhodno izmerjenih tipov spojev A-G in B-G določi skupino, v katero sodi testirani element. Podatek o skupini natanko določa naslednje korake, ki vodijo do končne identifikacije spoja A-B.

3.1.1.1 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-A ali G-B, brez ohmskih upornosti

V to skupino združimo kombinacije, prikazane na sliki 22.



Slika 22: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

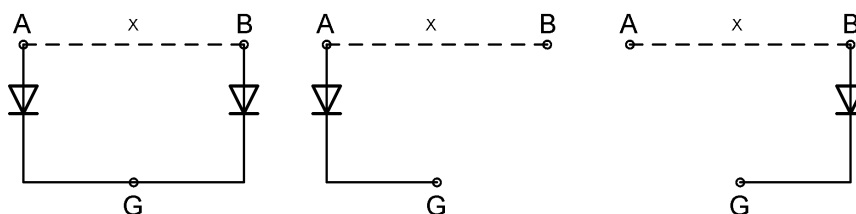
Kot je iz shem razvidno, je možno spoj X ločeno analizirati, kadar sta potenciala točk A in B večja ali enaka 0 V. Tedaj sta namreč tudi v najslabšem primeru oba polprevodniška spoja zaporno orientirana. Postopek testiranja spoja X je v tem primeru podoben testiranju spojev A-G in B-G, kar poteka po sledečem postopku:

- vir B nastavimo kot napetostni vir z napetostjo 0V in vir A kot tokovni vir s tokom 1 mA oziroma 0,5 mA,

- izvedemo enake meritve, kot pri spojih A-G in B-G za pozitivne tokove A-B,
- vir B nastavimo kot tokovni vir s tokom 1 mA oziroma 0,5 mA, vir A pa kot napetostni vir z napetostjo 0 V,
- napravimo enake meritve, kot pri spojih A-G in B-G za negativne tokove A-B,
- uporabimo enake pogoje, kot pri A-G in B-G za določitev tipa spoja.

3.1.1.2 Prevodno orientiran polprevodniški spoj A-G ali B-G, brez ohmskih upornosti

Za drugo skupino so značilne kombinacije, prikazane na sliki 23.



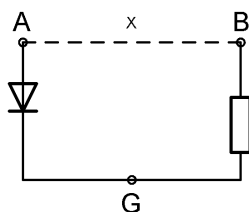
Slika 23: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

Tu velja obraten pogoj, kot pri skupini 1 – napetostna potenciala na točkah A in B morata biti v najslabšem primeru manjša ali enaka 0, da so ostali polprevodniški spoji vedno zaporno orientirani. Postopek za analizo spoja A-B je v tem primeru sledeč:

- vir A je napetostni vir z napetostjo 0 V, vir B pa tokovni vir s tokom -1 mA oziroma $-0,5$ mA,
- izvedemo enake meritve, kot pri spojih A-G in B-G za pozitivne tokove A-B,
- vir A nastavimo kot tokovni vir s tokom -1 mA oziroma $-0,5$ mA, vir B pa kot napetostni vir z napetostjo 0 V,
- napravimo enake meritve, kot pri spojih A-G in B-G za negativne tokove A-B,
- uporabimo enake pogoje, kot pri A-G in B-G za določitev tipa spoja.

3.1.1.3 Prevodno orientiran polprevodniški spoj A-G, ohmska upornost B-G

Tretja skupina vsebuje le eno kombinacijo, ki jo prikazuje sledeča slika 24.



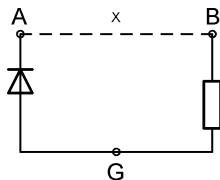
Slika 24: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

Ta kombinacija spojev zahteva poseben pristop. Za natančno merjenje je potrebno namreč zagotoviti, da ne teče noben tok preko PN spoja A-G in ohmskega upora B-G. PN spoj A-G izoliramo tako, da na njem vzdržujemo napetostni potencial, manjši ali enak 0V. Ohmski spoj lahko izoliramo le tako, da na njem vzdržujemo padec napetosti 0V. Ker je ena njegova sponka vedno vezana na maso, je edina možnost vzdrževanja potenciala sponke B na potencialu 0V. To pomeni, da praktično ne moremo izvesti merjenja, kadar teče tok od sponke A proti sponki B, temveč le v obratni smeri.

To omejitev vezave zaobidemo tako, da najprej opravimo meritev pri negativnem toku I_{AB} , pri čemer takoj prepoznamo ohmsko upornost na podlagi njene linearnosti. V tem primeru lahko analizo takoj končamo, saj je upornost neodvisna od orientacije spoja. Prav tako po nelinearnosti brez težav prepoznamo polprevodniški spoj, če je orientiran v smeri B-A, in zopet zaključimo analizo. V primeru, da se v smeri B-A spoj obnaša kot odprt, imamo na voljo še dve možnosti: lahko je dejansko odprt, ali pa je to zaporno orientiran diodni spoj. To ugotovimo tako, da postavimo vir B na 0V (da izoliramo ohmsko upornost), vir A pa nastavimo kot vir toka 1 mA. Sedaj se potencial sponke A dvigne nad 0V in diodni spoj A-G prične prevajati. Če je prisoten diodni spoj A-B, prične prevajati tudi ta (glede na to, da so polprevodniški spoji enega elementa običajno narejeni iz enakih materialov in imajo zato približno enake kolenske napetosti). Test spoja je sedaj preprost: če v spoj B ne teče noben tok, je spoj A-B odprt, če pa teče tok, ki se razlikuje od toka 1 mA za manj kot 80 %, je spoj diodni.

3.1.1.4 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-A, ohmska upornost B-G

V to skupino spada kombinacija na sliki 25.



Slika 25: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

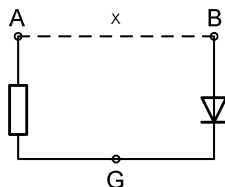
Kombinacija je praktično enaka tisti iz predhodne skupine, le da je tu diodni spoj med sponkama A in G obratno orientiran. Postopek ostane tako enak tistemu iz tretje skupine, spremenijo se le polaritete napetosti in tokov.

Ker mora ostati ohmski spoj izoliran, moramo tudi na sponki B vzdrževati potencial 0V. Če želimo obdržati diodni spoj A-G zaprt, moramo vzdrževati na sponki A pozitiven potencial. Posledica tega je, da lahko enostavno analiziramo le spoj v smeri A-B. Tu tako kot prej preverimo njegovo linearnost, in če se izkaže za linearnega, analizo prekinemo, saj ima ohmski spoj v obeh smereh enako upornost. Ravno tako je analiza zaključena, če zaznamo diodni spoj v prevodni smeri.

V primeru, da zaznamo odprte sponke, je potrebno merjenje v obratni smeri, saj moramo ločiti med primeroma dejansko odprtih sponk ali pa diodnega spoja v zaporni smeri. To storimo tako, da nastavimo tok vira A na -1 mA , kar povzroči prevajanje toka preko diodnega spoja A-G. Če imamo med sponkama B-A diodni spoj, se bo tok razdelil med obe veji, zato bomo zaznali tok iz sponke B, ki se od toka -1 mA razlikuje za manj kot 80 %. Če se ta tok ne pojavi, je spoj B-A dejansko odprt.

3.1.1.5 Prevodno orientiran polprevodniški spoj B-G, ohmska upornost A-G

Ustrezna kombinacija za to skupino je prikazana na sliki 26.

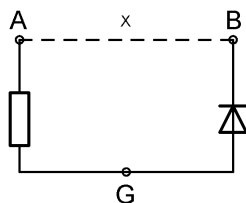


Slika 26: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

Postopek je ekvivalenten tistemu, ki je v uporabi pri prevodno orientiranemu polprevodniškemu spoju A-G z ohmska upornost B-G - edina razlika je, da se zamenjata vlogi vira A in B.

3.1.1.6 Prevodno orientiran polprevodniški spoj G-B, ohmska upornost A-G

Na sliki 27 si oglejmo še zadnjo možno kombinacijo.



Slika 27: Možne vezave testiranih spojev v opisani skupini.

Tu gre za postopek, ekvivalenten tistemu pri prevodno orientiranemu polprevodniškemu spoju G-A z ohmska upornostjo B-G. Edina razlika je v tem, da sta se zamenjali vlogi virov A in B.

3.2 Druga faza identifikacije – razvrščanje elementov po skupinah glede na tip spojev

Ko nam metoda Isci_spoje vrne podatke o tem, katere spoje vsebuje testirani element in na katerem mestu se nahajajo, pride na vrsto grupiranje elementov z enakimi spoji za nadaljnjo analizo. V nadaljevanju sledijo opisi in nadaljnji koraki po skupinah elementov.

3.2.1 Elementi z dvema diodnima spojema in brez ohmske upornosti

Ta skupina vključuje izmed osnovnih polprevodniških elementov le bipolarni tranzistorje NPN in PNP tipa. Pri obravnavi različnih kombinacij dobljenih tipov spojev se izkaže, da lahko že s temi, v prvi fazi dobljenimi podatki, določimo tip bipolarnega tranzistorja (NPN, PNP), ter položaj bazne sponke.

Programska aplikacija ta podatek določi iz tabele 4, ki prikazuje dobljene meritve v odvisnosti od tipa testiranega bipolarnega tranzistorja in razporeda njegovih sponk. Zgornji del tabele prikazuje, na katero sponko merilnega sistema so v posameznem primeru priključene posamezne sponke tranzistorja (sponke A, B in G). Spodnji del tabele pove, kakšne so dobljene meritve za vsak stolpec s svojim načinom priklopa. Če je v spodnjem delu tabele vpisana vrednost 1 pomeni, da je bil identificiran diodni spoj v enaki orientaciji, kot je označeno v prvi vrstici tabele. Vrednost -1 pomeni, da je identificirani diodni spoj orientiran ravno obratno, vrednost 0 pa pomeni, da med sponkama ni diodnega spoja.

	NPN					
A	B	C	C	B	E	E
B	C	B	E	E	B	C
G	E	E	B	C	C	B

PNP					
B	C	C	B	E	E
C	B	E	E	B	C
E	E	B	C	C	B

A-G	1	0	-1	1	0	-1
B-G	0	1	-1	0	1	-1
A-B	1	-1	0	1	-1	0

-1	0	1	-1	0	1
0	-1	1	0	-1	1
-1	1	0	-1	1	0

Tabela 4: Vpogledna tabela za določitev tipa bipolarnega tranzistorja in položaja bazne sponke.

Iz tako sestavljene tabele je razvidno, da se v spodnji polovici pojavljajo enake vrednosti le pri načinu vezav, kjer je baza na istem mestu. To nam omogoča, da iz tabele takoj razberemo, na kateri sponki merilnika se nahaja baza testiranega tranzistorja. Hkrati ugotovimo tudi tip tranzistorja, saj se pri spremembi tipa ohrani enaka shema meritev, le vrednost 1 zamenja -1, in obratno.

Ko je položaj baze znan, preostane določitev sponk emitorja in kolektorja. Žal ju ne moremo identificirati iz tabele, ker nam ta ne nudi dovolj informacij. Zato se poslužujemo enega izmed specifičnih parametrov tranzistorja: faktorja tokovnega ojačenja β . Osnovna ideja testa je preprosta: ker vemo položaj baze, vezemo tranzistor v vezavo s skupnim emitorjem ter izmerimo faktor β . To meritev opravimo dvakrat, vsakič z drugačno vezavo (ker nam preostaneta samo dve sponki za identifikacijo, z dvema meritvama zaobjamemo vse možne kombinacije emitor/kolektor). Po opravljenih meritvah določimo pravi položaj emitorja in kolektorja tako, da je faktor β največji.

3.2.2 Elementi z dvema diodnima spojema in ohmsko upornostjo

Tipični predstavnik te skupine elementov je JFET tranzistor. Kanal tranzistorja namreč izkazuje ohmski značaj, dokler ga ne krmilimo preko vrat. Hkrati se glede diodnih spojev JFET tranzistor obnaša na enak način, kot bipolarni tranzistor, saj ima en diodni spoj med vrati in izvorom ter drugega med vrati in ponorom.

Glede na podobnost z bipolarnim tranzistorjem v smislu diodnih spojev, uporabimo enak postopek kot pri bipolarnem tranzistorju za določitev položaja sponke vrat in za določitev tipa kanala tranzistorja (N-kanalni, P-kanalni). Položaja sponk izvora in ponora se pri JFET tranzistorju ne da določiti na osnovi statičnih meritev, zato tega podatka ne moremo pridobiti s pomočjo sistema MSP.

Da bi bil test JFET-ov natančnejši, bi lahko v testno proceduro uvedli tudi preverjanje delovanja preko zapiranja kanala s pomočjo napetosti na vratih. Glede na to, da pri identifikaciji delujočega JFET-a ta postopek ni potreben, ga v programsko aplikacijo nismo vključili. Vpogledno tabelo, ki jo aplikacija uporablja za določitev tipa kanala ter položaja vrat, prikazuje tabela 5, kjer vidimo, da je le-ta ekvivalentna tisti pri bipolarnem tranzistorju.

	JFET, N kanal							JFET, P kanal					
A	G	D	D	G	S	S		G	D	D	G	S	S
B	D	G	S	S	G	D		D	G	S	S	G	D
G	S	S	G	D	D	G		S	S	G	D	D	G
A-G	1	0	-1	1	0	-1		-1	0	1	-1	0	1
B-G	0	1	-1	0	1	-1		0	-1	1	0	-1	1
A-B	1	-1	0	1	-1	0		-1	1	0	-1	1	0

Tabela 5: Vpogledna tabela za določitev tipa JFET tranzistorja in položaja sponke vrat.

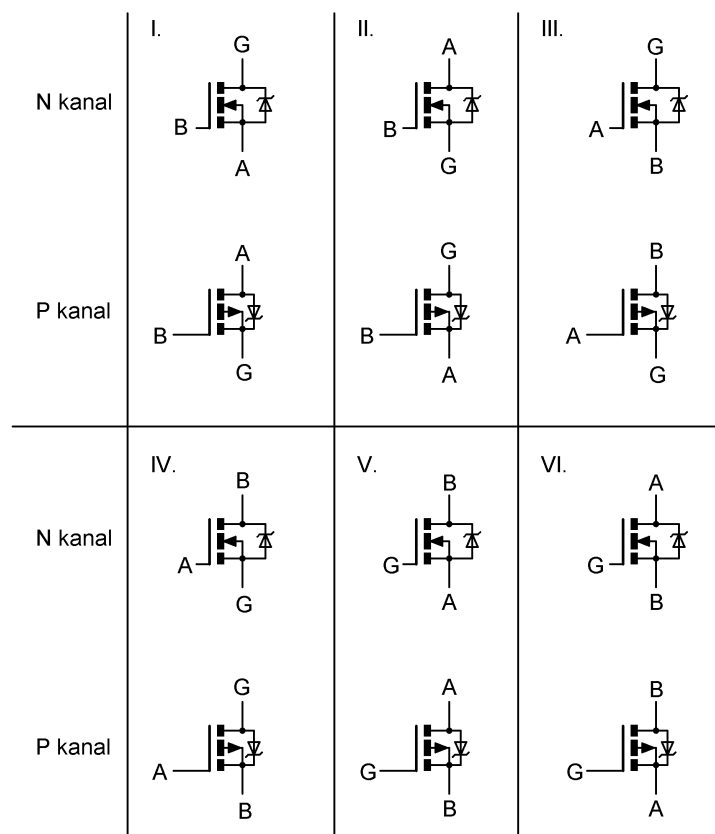
3.2.3 Elementi z enim diodnim spojem in brez ohmske upornosti

Takih elementov je več, sistem MSP zna prepoznati običajne polprevodniške diode, LED diode, Schottkyjeve diode in močnostne MOSFET tranzistorje z induciranim kanalom N ali P tipa. Prepoznavanja Zenerjevih diod nismo izvedli zaradi tega, ker izkazujejo le-te v eni smeri kolensko napetost polprevodniškega spoja, v drugi smeri pa Zenerjevo prebojno napetost. Ta lastnost povzroči težave pri identifikaciji, ker je programski algoritem ne zna upoštevati.

Pri analizi se spoj najprej smatra kot navadna dioda. To trditev se nato potrdi ali pa ovrže z dodatnimi testi. Vseh možnih kombinacij enega diodnega spoja med tremi sponkami je šest, pri tem pa je potrebno še dodatno upoštevati, da vsaka izmed teh kombinacij vključuje dva tipa MOSFET tranzistorjev: z N ali P kanalom. Vseh možnosti je torej dvanajst.

Natančnejšo analizo opravimo tako, da glede na položaj in orientacijo diodnega spoja sestavimo dodatnih šest skupin (kolikor je možnih kombinacij). Vsaka skupina nudi tri možnosti, med katerimi je potrebno razlikovati: običajna dioda (v tem primeru spadata sem tudi LED dioda in Schottkyjeva dioda), MOSFET z induciranim N kanalom in MOSFET z induciranim P kanalom.

Ločevanje običajne diode od MOSFET-ov se vrši s pomočjo dejstva, da se da MOSFET krmiliti s pomočjo tretje sponke, diode pa ne. Testirane MOSFET-e se deli v šest skupin na podlagi položaja polprevodniškega spoja. Vsaka taka skupina lahko vključuje MOSFET tranzistor z N ali P kanalom, zato je potrebno za dokončno identifikacijo opraviti dodatne teste. Če lahko element spravimo v prevodno stanje (izvor in ponor vežemo na tokovni vir s tokom 1 mA) s pomočjo pozitivne napetosti na vratih, vemo, da je testirani element MOSFET z induciranim N kanalom. Če prične element prevajati pri negativni napetosti na vratih, imamo opravka z MOSFET-om z induciranim P kanalom. Če element v nobenem izmed teh dveh primerov ne prične prevajati, imamo opravka z običajno diodo. Vse skupine (brez običajnih diod) so narisane na sliki 28.



Slika 28: Vse možne vezave MOSFET tranzistorja na sistem MSP, urejene po skupinah (I - VI).

3.2.4 Elementi brez diodnih spojev in z eno ohmsko upornostjo

To je trivialen primer, ker je tak element lahko le običajen upor.

4 Analiza merilnih negotovosti

Prednost uporabe mikrokrmilnika in osebnega računalnika v merilnem sistemu MSP je možnost učinkovite programske kompenzacije nekaterih neidealnosti sestavnih elementov vezja, ki bi sicer neposredno vplivale na merilno negotovost. Za učinkovito programsko kompenzacijo potrebujemo AD pretvornik z dovolj visoko ločljivostjo - v našem primeru smo v ta namen uporabili 24-bitni ADS1211.

Merilni sistem MSP je zgrajen na konceptu, ki se pogosto pojavlja v modernih merilnih sistemih. Njegovo bistvo je uporaba cenених (neprecizijskih) elektronskih elementov v analognem delu vezja, kjer je to mogoče. Temu delu (katerega kakovost bi sicer najbolj vplivala na merilno negotovost) sledi kvaliteten AD pretvornik z visoko ločljivostjo. Za odpravo napak cenenega analognega vezja, AD pretvornik podpremo z mikrokrmilnikom oziroma računalnikom, na katerem se izvaja ustrezna merilna programska oprema.

Prednosti takega sistema pred sistemom, v katerem se nizka merilna negotovost zagotavlja s pomočjo dragih precizijskih elementov, sta očitni: nižja cena pri doseganju merilnih pogreškov istega velikostnega reda. Poleg tega mikrokrmilnik oziroma računalnik omogočata prilagodljivost, ki še dodatno poveča uporabnost sistema.

Pri načrtovanju merilnih naprav, ki uporabljajo omenjeni koncept, moramo biti previdni. Ceneni analogni elementi so namreč slabši od precizijskih tudi v nekaterih lastnostih, ki jih je programsko težko kompenzirati. Tipičen primer je lezenje parametrov elementa s temperaturo. Ceneni elementi so običajno mnogo bolj podvrženi temperaturnim spremembam, kot precizijski. Programsko napak zaradi tega pojava ne moremo neposredno kompenzirati, lahko pa jih zmanjšamo s pogostim ponavljanjem kalibracije merilnega vezja med posameznimi meritvami.

Druga značilna težava pri takih napravah je morebitna nelinearnost analognega dela vezja. Analogni del sistema MSP je dokaj linearen, zato smo se težavam te vrste enostavno izognili – v programski opremi smo karakteristike analognega dela lahko obravnavali kot premice, brez da bi v merilni rezultat vnesli preveliko napako. Razmere se bistveno spremenijo pri uporabi nelinearnih merilnih pretvornikov (npr. NTC upor za merjenje temperature). V takih primerih si lahko pomagamo z vpoglednimi tabelami v programski opremi, preko katerih karakteristiko merilnega pretvornika lineariziramo. Pri tem je včasih potrebno upoštevati, da se tudi nelinearna karakteristika merilnega pretvornika spreminja s katerim izmed parametrov okolja.

Že omenjena napaka pri merjenju toka, ki se pojavi zaradi končnega CMRR instrumentacijskega ojačevalnika, linearno narašča z izhodno napetostjo. Načeloma bi jo lahko vsaj delno kompenzirali programsko (preko merjenja izhodne napetosti in ocenjene vrednosti faktorja CMRR). Popolna kompenzacija tega pojava žal ni mogoča, saj se faktor CMRR spreminja od naprave do naprave, poleg tega je odvisen tudi od vplivov okolja, kot je npr. temperatura. Edina prava rešitev bi bila uporaba boljšega instrumentacijskega ojačevalnika z večjim faktorjem CMRR.

V nadaljevanju bomo analizirali pogreške, ki se pojavljajo pri merjenju s sistemom MSP.

4.1 Merjenje napetosti

K napaki merjenja napetosti prispevajo sledeči viri:

- začetna toleranca napetostne reference,
- napetostni in tokovni premiki operacijskih ojačevalnikov,
- tolerance uporov, ki določajo ojačenja v vezju,
- spreminjanje potenciala mase zaradi tokov preko njenih vodnikov,
- napaka kvantizacije AD pretvornika.

Začetna toleranca napetostne reference določa najnižjo možno merilno negotovost, saj njene napetosti ne moremo kompenzirati. V našem primeru smo želeno preciznost dosegli z referenco ADR444BRZ, ki jo odlikuje nizka začetna toleranca (0,04 %) in nizek koeficient termične odvisnosti izhodne napetosti (3 ppm/°C).

Napetostni in tokovni premiki operacijskih ojačevalnikov so velik vir napake, ki pa jo enostavno kompenziramo v programski opremi. Da bi še dodatno zmanjšali napake, povzročene zaradi tokovnih premikov in vhodnih tokov operacijskega ojačevalnika, smo v vezju skrbeli za to, da sta upornosti na obeh vhodnih sponkah pri operacijskih ojačevalnikih čimbolj enaki. Poudariti je potrebno, da so tako napetostni kot tokovni premiki temperaturno odvisni. Programska kalibracija je torej veljavna le pri konstantni temperaturi elementov v vezju - ob vsaki temperaturni spremembi se napaka meritve poveča. Zaradi tega je potrebno kalibracijo pogosto ponavljati in meriti z vezjem, segretim na delovno temperaturo.

Toleranca uporov je vir napake, ki se tudi kompenzira programsko, ker se odraža v linearnih napakah merilnika (premik, ojačenje). V vezju smo uporabili kovinoplastne upore s toleranco 1 % in tako zmanjšali omenjene napake.

Povratni tokovi, ki tečejo v maso, povzročajo na upornosti mase padec napetosti, kar privede do tako imenovane modulacije mase. Tega pojava se ne da programsko kompenzirati, je pa mogoče poskrbeti, da je njegov prispevek majhen, s pravilno konstrukcijo tiskanega vezja. Ker je bilo vezje sprva napravljeno na prototipnih ploščah, je bilo na njem težko preprečiti modulacijo mase. Ko smo napravo prenesli na tiskano vezje, smo za učinkovito zniževanje impedance mase uporabili masni sloj (ang.: ground plane).

Napaka kvantizacije AD pretvornika je stalni spremljevalec vseh AD pretvornikov. Ker je uporabljeni AD pretvornik 24-biten, je ta napaka zelo majhna. V vezju uporabljamo 17 bitni zajem.

Za izračun teoretične vrednosti končnega merilnega pogreška pri merjenju napetosti, potrebujemo torej le podatka o začetni toleranci napetostne reference in ločljivosti AD pretvornika. Absolutni pogrešek referenčne napetosti podaja enačba (2).

$$\Delta U_R = U_{NR} \cdot 0,04 \% = 4,096 \text{ V} \cdot 0,04 \% = \pm 1,64 \text{ mV} \quad (2)$$

Ker se s to referenco kalibrira napetostna merilna veja, ki ima dejansko večje merilno območje, moramo tudi izračunani pogrešek razširiti čez celotno merilno področje. Merilno območje obsega napetosti od $-7,8 \text{ V}$ do $+7,8 \text{ V}$, kar pomeni $15,6 \text{ V}$ razpona. Največji pogrešek na celotnem območju kalibriranega merilnika podaja enačba (3).

$$\Delta U_{RC} = \frac{15,6 \text{ V}}{4,096 \text{ V}} \cdot 1,64 \text{ mV} = \pm 6,25 \text{ mV} \quad (3)$$

Temu pogrešku moramo dodati še pogrešek zaradi kvantizacije. Ta znaša pri 17-bitnem zajemu podatkov:

$$\Delta U_K = \frac{15,6 \text{ V}}{2^{18}} = \pm 60 \text{ } \mu \text{V} \quad (4)$$

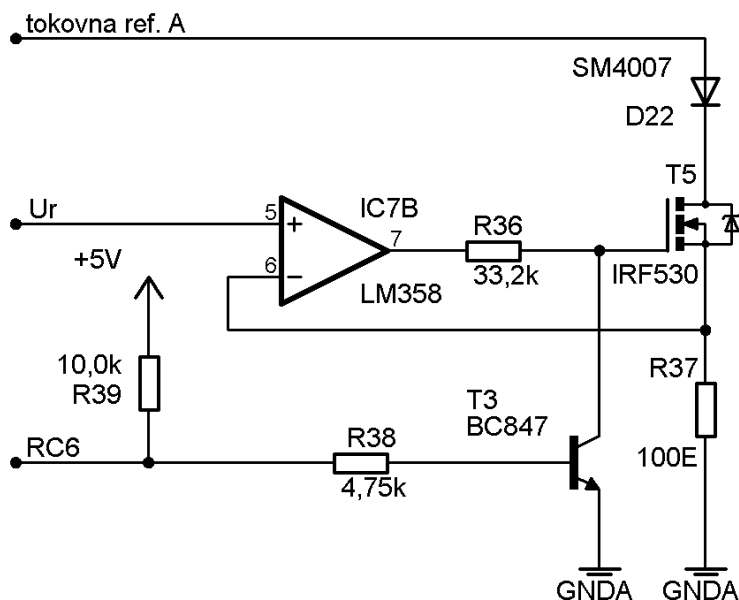
Skupni pogrešek znaša torej v najslabšem primeru $\Delta U_{RC} + \Delta U_K = \pm 6,31 \text{ mV}$. Če ga izrazimo v relativni obliki, dobimo naslednji rezultat.

$$e[\%] = \frac{6,31 \text{ mV}}{15,6 \text{ V}} \cdot 100 \% = \pm 0,04 \% \quad (5)$$

Ker sta pri merjenju napetosti oba vira (A in B) konstrukcijsko enaka, je tudi merilni pogrešek obeh enak.

4.2 Merjenje toka – vir A

Na sliki 29 je ponovno prikazana shema tokovne reference vira A, ki jo potrebujemo pri analizi pogreškov.



Slika 29: Tokovna referenca vira A.

Pogrešek referenčnega toka je sestavljen iz prispevkov:

- napetostnega premika operacijskega ojačevalnika IC7B,
- začetne tolerance napetostne reference U_r ,
- tolerance merilnega upora R37.

Vhodna referenca ima nazivno napetost $U_r = 4,096 \text{ V}$ pri začetni toleranci 0,04 %. To pomeni, da znaša dejanska referenčna napetost $4,096 \text{ V} \pm 1,64 \text{ mV}$. Napetostni premik uporabljenega operacijskega ojačevalnika LM358 znaša pri 25°C maksimalno 7 mV. Pri analizi bom uporabil maksimalni napetostni premik, da bodo tako dobljeni rezultati veljavni tudi v najmanj ugodnih primerih. Vhodni tok znaša pri 25°C maksimalno -250 nA in tokovni premik pri isti temperaturi maksimalno 50 nA, kar pomeni zanemarljivo majhen vpliv na toleranco tokovnega vira, ker sta oba vhoda operacijskega ojačevalnika priključena na nizkoimpedančni vir (maksimalno 100Ω). Toleranca merilnega upora znaša 1 %, in ta predstavlja največji prispevek h končni toleranci dobljenega tokovnega vira.

Nazivni tok reference izračunamo iz nazivnih podatkov, ki pri idealnih elementih vezja (brez napak) znaša:

$$I_N = \frac{U_{RN}}{R_{37}} = \frac{4,096 \text{ V}}{100 \Omega} = 40,96 \text{ mA} \quad (6)$$

Minimalni izhodni tok izračunamo na podlagi sledečih maksimalnih napak v vezju:

- minimalna izhodna napetost napetostne reference $U_{R,\min} = 4,094 \text{ V}$,
- maksimalni napetostni premik operacijskega ojačevalnika v negativni smeri: $-U_P = -7 \text{ mV}$,
- maksimalna vrednost upornosti merilnega upora: $R_{37,\max} = 101 \Omega$.

Po enačbi (7) ta tok znaša:

$$I_{R,\min} = \frac{U_{R,\min} - U_P}{R_{37,\max}} = 40,46 \text{ mA} \quad (7)$$

Maksimalni izhodni tok izračunamo na podlagi sledečih maksimalnih napak v vezju:

- maksimalna izhodna napetost napetostne reference $U_{R,\max} = 4,098 \text{ mV}$,
- maksimalni napetostni premik operacijskega ojačevalnika v pozitivni smeri: $U_P = 7 \text{ mV}$,
- minimalna vrednost upornosti merilnega upora: $R_{37,\min} = 99 \Omega$.

Po enačbi (8) znaša:

$$I_{R,\max} = \frac{U_{R,\max} + U_P}{R_{37,\min}} = 41,47 \text{ mA} \quad (8)$$

Končni absolutni pogrešek znaša:

$$\Delta I_R = \pm \frac{I_{R,\max} - I_{R,\min}}{2} = \pm 0,51 \text{ mA} \quad (9)$$

Če rezultat izrazimo v relativni obliki, dobimo sledeči rezultat::

$$e[\%] = \frac{\Delta I_R}{I_N} = \frac{0,51 \text{ mA}}{40,96 \text{ mA}} \cdot 100 \% = 1,25 \% \quad (10)$$

Skupni pogrešek merilnika toka je neposredno odvisen od pogreška tokovne reference, razširjenega na celotno območje izhodnih tokov, ter prispevka zaradi kvantizacije.

Pogrešek tokovne reference, razširjen na celotno tokovno merilno območje ($\pm 85 \text{ mA}$) podaja enačba (11):

$$\Delta I_{RC} = \frac{I_{RC}}{I_N} \cdot \Delta I_R = \frac{170 \text{ mA}}{40,96 \text{ mA}} \cdot 0,51 \text{ mA} = \pm 2,12 \text{ mA} \quad (11)$$

Prispevek zaradi kvantizacije znaša pri 17 bitih zajema:

$$\Delta I_K = \frac{I_{RC}}{2^{18}} = \pm 0,65 \text{ } \mu\text{A} \quad (12)$$

Skupni pogrešek znaša $\Delta I_{CO} + \Delta I_K = \pm 2,12 \text{ mA} \pm 0,65 \text{ } \mu\text{A} = \pm 2,12 \text{ mA}$.

Temu pogrešku moramo pri izhodnih bremenih z višjimi vrednostmi upornosti dodati še pogrešek zaradi vpliva izhodne sofazne napetosti na tokovni vir. Ta znaša pri maksimalni upornosti bremena na izhodu vira $\pm 23 \text{ } \mu\text{A}$, torej skupaj $2,12 \text{ mA} + 23 \text{ } \mu\text{A} = 2,15 \text{ mA}$. Relativni pogrešek je tako po enačbi (12) enak:

$$e[\%] = \frac{2,15 \text{ mA}}{170 \text{ mA}} \cdot 100 \% = 1,26 \% \quad (13)$$

4.3 Merjenje toka – vir B

Analiza je praktično enaka tisti pri viru A, le da imamo tu drugačen nazivni tok reference (4,096 mA) in drugačen merilni upor povratne zanke R37 (1000 Ω). Ostali podatki in viri pogreškov so enaki kot pri viru A.

Nazivni tok reference izračunamo iz nazivnih podatkov in pri nominalnih parametrih elementih vezja po naslednji enačbi.

$$I_N = \frac{U_{RN}}{R_{37}} = \frac{4,096 \text{ V}}{1000 \Omega} = 4,096 \text{ mA} \quad (14)$$

Maksimalno odstopanje referenčnega toka v negativni smeri povzročijo naslednje vrednosti vplivnih veličin vezja:

- minimalna izhodna napetost napetostne reference $U_{R,\min} = 4,094 \text{ V}$,
- največji napetostni premik operacijskega ojačevalnika v negativni smeri $-U_P = -7 \text{ mV}$,
- maksimalna vrednost upornosti merilnega upora: $R_{37,\max} = 1010 \Omega$.

Iz teh podatkov dobimo največjo možno napako v negativni smeri (enačba (15)).

$$I_{R,\min} = \frac{U_{R,\min} - U_P}{R_{37,\max}} = 4,046 \text{ mA} \quad (15)$$

Maksimalno odstopanje referenčnega toka v pozitivni smeri se pojavi pri sledečih vrednostih vplivnih veličin:

- maksimalna izhodna napetost napetostne reference $U_{R,max} = 4,098 \text{ V}$,
- največji napetostni premik operacijskega ojačevalnika v pozitivni smeri $U_P = 7 \text{ mV}$,
- minimalna vrednost upornosti merilnega upora: $R_{37,min} = 990 \text{ } \Omega$.

Iz teh podatkov dobimo največjo možno napako v pozitivni smeri:

$$I_{R,max} = \frac{U_{R,max} + U_P}{R_{37,min}} = 4,147 \text{ mA} \quad (16)$$

Končni absolutni pogrešek znaša:

$$\Delta I_R = \pm \frac{I_{R,max} - I_{R,min}}{2} = \pm 50,5 \text{ } \mu\text{A} \quad (17)$$

Isti pogrešek, izražen v relativni obliki, znaša:

$$e[\%] = \frac{\Delta I_R}{I_N} \cdot 100 \% = 1,24 \% \quad (18)$$

Skupni pogrešek merilnika toka je neposredno odvisen od pogreška tokovne reference, razširjenega na celotno območje izhodnih tokov, ter prispevka zaradi kvantizacije.

Pogrešek tokovne reference, razširjen na celotno tokovno merilno območje ($\pm 8,5 \text{ mA}$), podaja naslednja enačba.

$$\Delta I_{RC} = \frac{17 \text{ mA}}{4,096 \text{ mA}} \cdot 50,5 \text{ } \mu\text{A} = \pm 210 \text{ } \mu\text{A} \quad (19)$$

Prispevek zaradi kvantizacije znaša pri 17 bitih zajema:

$$\Delta I_K = \frac{17 \text{ mA}}{2^{18}} = \pm 0,065 \text{ } \mu\text{A} \quad (20)$$

Skupni pogrešek znaša $\Delta I_{RC} + \Delta I_K = 210 \text{ } \mu\text{A} + 0,065 \text{ } \mu\text{A} = \pm 210 \text{ } \mu\text{A}$.

Temu pogrešku moramo pri izhodnih bremenih z višjimi vrednostmi upornosti dodati še pogrešek zaradi vpliva izhodne sofazne napetosti na tokovni vir. Ta znaša pri maksimalni upornosti bremena na izhodu vira $\pm 2,3 \text{ } \mu\text{A}$, torej skupaj $210 \text{ } \mu\text{A} + 2,3 \text{ } \mu\text{A} = 213 \text{ } \mu\text{A}$. Relativni pogrešek je tako po enačbi (21) enak 1,26 %.

$$e[\%] = \frac{213 \text{ } \mu\text{A}}{17 \text{ mA}} \cdot 100 \% = 1,26 \% \quad (21)$$

5 Verifikacija sistema MSP

Da bi se prepričali o natančnosti in kakovosti izdelanega merilnega sistema, smo na njem opravili meritve s preciznim in certificiranim merilnikom električnih veličin, ki je bil digitalni multimeter Agilent 34401A z natančnostjo 6,5 decimalnih mest. Merili smo pogreške merilnega sistema in notranje upornosti virov.

5.1 Merjenje pogreškov merilnega sistema

Meritve smo opravili z namenom, da bi potrdili teoretično izračunane merilne pogreške sistema pri merjenju napetosti. V ta namen smo s pomočjo testne aplikacije na virih sistema MSP nastavljali izhodne napetosti od $-7,8$ do $+7,8$ V, s približnim korakom 1 V. Izhodno napetost smo merili s preciznim instrumentom, hkrati pa odčitavali vrednosti, ki jih je izmeril sam sistem. Rezultati meritev napetosti na viru A so podani v tabeli 6. V isti tabeli najdemo tudi podatke o razlikah med obema meritvama.

$U_{MSP,A} \text{ (V)}$	$U_{INST,A} \text{ (V)}$	$\Delta U \text{ (mV)}$
-7,799	-7,80031	1,31
-7,002	-7,00274	0,74
-6,000	-5,99990	-0,10
-5,001	-5,00078	-0,22
-4,002	-4,00153	-0,47
-2,998	-2,99748	-0,52
-1,999	-1,99825	-0,75
-1,001	-1,00039	-0,61
-0,002	-0,00200	0
0,998	0,99810	-0,10
2,001	2,00107	-0,07
3,000	3,00015	-0,15
3,999	3,99915	-0,15
4,999	4,99875	-0,25
6,003	6,00158	1,42
7,001	7,00056	0,44
7,800	7,79845	1,55

Table 6: Meritve za izračun napetostnega pogoška vira A.

Absolutni pogrešek vira A merilnega sistema MSP izračunamo po enačbi (22):

$$\Delta U_A = \pm \max(\Delta U) = 1,55 \text{ mV} \quad (22)$$

Isti pogrešek, zapisan v relativni obliki, znaša:

$$e[\%] = \pm \frac{\Delta U_A}{U_{A,\max} - U_{A,\min}} \cdot 100 \% = 0,01 \% \quad (23)$$

Na enak način smo opravili meritve tudi na viru B – zbrane so v tabeli 7.

$U_{MSP,B}$ (V)	U_{INST} (V)	ΔU (mV)
-7,800	-7,800248	0,25
-7,002	-7,00326	1,26
-6,001	-6,00167	0,67
-5,000	-5,00012	0,12
-3,998	-3,99842	0,42
-3,000	-3,00028	0,28
-1,998	-1,99836	0,36
-0,998	-0,99813	0,13
-0,001	-0,00119	0,19
1,000	1,00027	-0,27
2,002	2,00182	0,180
2,999	2,99927	-0,27
4,001	4,00069	0,31
5,002	5,00199	0,01
6,000	5,99965	0,35
7,002	7,00086	1,14
7,801	7,80011	0,89

Table 7: Meritve za izračun napetostnega pogoška vira B.

Absolutni pogrešek vira B merilnega sistema MSP po enačbi (24) znaša:

$$\Delta U_B = \pm \max(\Delta U) = 1,26 \text{ mV} \quad (24)$$

Isti pogrešek, zapisan v relativni obliki, znaša:

$$e[\%] = \pm \frac{\Delta U_B}{U_{B,\max} - U_{B,\min}} \cdot 100 \% = 0,008 \% \quad (25)$$

Pogreške pri merjenju toka smo izmerili na podoben način – precizen merilnik toka smo priključili na izhod vira A in nastavljali izhodne tokove, katerih vrednosti so bile medsebojno enakomerno razmaknjene. Tako dobljene izmerke s sistema MSP in preciznega instrumenta smo zapisali v tabelo 8, skupaj z razlikami med njimi.

$I_{MSP,A}$ (mA)	I_{INST} (mA)	ΔI (μA)
-84,960	-84,762	-198
-79,982	-79,790	-192
-69,988	-69,812	-176
-59,971	-59,847	-124
-49,976	-49,865	-111
-39,996	-39,902	-94
-29,979	-29,913	-66
-19,994	-19,948	-46
-9,973	-9,9487	-24,3
0,007	0,0089	-1,9
10,000	9,9801	19,9
20,030	19,985	45
30,009	29,942	67
40,032	39,937	95
50,012	49,894	118
60,007	59,840	167
70,040	69,864	176
80,047	79,760	287
85,031	84,806	225

Table 8: Meritve za izračun tokovnega pogreška vira A.

Absolutni pogrešek je zopet enak maksimalnemu odstopanju med lastnimi meritvami sistema MSP in meritvami preciznega instrumenta:

$$\Delta I_A = \pm \max(\Delta I) = 287 \mu A \quad (26)$$

Isti pogrešek, zapisan v relativni obliki, znaša:

$$e[\%] = \pm \frac{\Delta I_A}{I_{A,\max} - I_{A,\min}} \cdot 100 \% = 0,17 \% \quad (27)$$

Podobno smo opravili meritve še na viru B (tabela 9).

$I_{MSP,B}$ (mA)	$I_{INST,B}$ (mA)	ΔI (μA)
-8,502	-8,4881	-13,9
-8,001	-7,9875	-13,5
-7,003	-6,9901	-12,9
-6,004	-5,9924	-11,6
-5,001	-4,9906	-10,4
-4,001	-3,9931	-7,9
-3,002	-2,9956	-6,4
-2,002	-1,9977	-4,3
-1,002	-1,0001	-1,9
-0,002	-0,0020	0
0,998	0,9957	2,3
1,997	1,9932	3,8
2,998	2,9916	6,4
3,997	3,9888	8,2
4,997	4,9864	10,6
5,997	5,9847	12,3
7,001	6,9869	14,1
8,002	7,9851	16,9
8,500	8,4821	17,9

Table 9: Meritve za izračun tokovnega pogreška vira B.

Absolutni pogrešek:

$$\Delta I_B = \pm \max(\Delta I) = 17,9 \mu A \quad (28)$$

Isti pogrešek, zapisan v relativni obliki:

$$e[\%] = \pm \frac{\Delta I_B}{I_{B,max} - I_{B,min}} \cdot 100 \% = 0,11 \% \quad (29)$$

5.2 Merjenje notranjih upornosti virov

Kakovost virov sistema MSP smo preverili z merjenjem njihovih notranjih upornosti. V napetostnem režimu delovanja smo jih izmerili s pomočjo izhodnega ohmskega bremena (uporovna kaskada) take upornosti, da je preko njega stekel pri dani izhodni napetosti vira primeren tok. Iz padca napetosti pri obremenitvi vira, ki je imel prvotno odprte sponke in toka pri priključenem bremenu, smo izračunali notranjo upornost napetostnega vira.

Pri viru A smo dobili sledeče meritve za izračun notranje upornosti napetostnega vira (tabela 10):

$I_{OS,A}$ (mA) – tok odprtih sponk	0
$I_{BR,A}$ (mA) – tok bremena	78,084
$U_{OS,A}$ (V) – napetost odprtih sponk	7,502
$U_{BR,A}$ (V) – napetost bremena	7,501
$R_{BR,A}$ (Ω) – upornost bremena	90

Table 10: Meritve za izračun Theveninove upornosti vira A.

Po enačbi (30) dobimo Theveninovo notranjo upornost:

$$R_{Th} = \frac{U_{OS,A} - U_{BR,A}}{I_{BR,A} - I_{OS,A}} = 12.8 \text{ m}\Omega \quad (30)$$

Enak postopek ponovimo pri viru B (tabela 11):

$I_{OS,B}$ (mA) – tok odprtih sponk	0
$I_{BR,B}$ (mA) – tok bremena	8,282
$U_{OS,B}$ (V) – napetost odprtih sponk	7,50254
$U_{BR,B}$ (V) – napetost bremena	7,50073
$R_{BR,B}$ (Ω) – upornost bremena	900

Table 11: Meritve za izračun Theveninove upornosti vira B.

Po enačbi (31) dobimo Theveninovo notranjo upornost:

$$R_{Th,B} = \frac{U_{OS,B} - U_{BR,B}}{I_{BR,B} - I_{OS,B}} = 0,22 \, \Omega \quad (31)$$

Notranjo upornost tokovnega vira smo izmerili na podoben način. Na izhod smo ravno tako priključili ohmsko breme (upor), na katerem smo dobili primerno velik padec napetosti. Nortonovo upornost tokovnega vira smo izračunali iz izmerjenih tokov in napetosti pri odprtih sponkah in pri z ohmskim bremenom obremenjenem viru.

Pri viru A smo dobili sledeče meritve (tabela 12):

$I_{KS,A}$ (mA) – tok kratkega stika	69,855
$I_{BR,A}$ (mA) – tok bremena	69,845
$U_{BR,A}$ (V) – napetost bremena	2,510
$U_{KS,A}$ (mV) – napetost kratkega stika	0,401
$R_{BR,A}$ (Ω) – upornost bremena	30

Table 12: Meritve za izračun Nortonove upornosti vira A.

Nortonova upornost vira A po enačbi (32) znaša:

$$R_{N,A} = \frac{U_{BR,A} - U_{KS,A}}{I_{KS,A} - I_{BR,A}} = 210 \, k\Omega \quad (32)$$

Meritve na viru B so nam dale rezultate iz tabele 13:

$I_{KS,B}$ (mA) – tok kratkega stika	7,486
$I_{BR,B}$ (mA) – tok bremena	7,485
$U_{BR,B}$ (V) – napetost bremena	2,514
$U_{KS,B}$ (V) – napetost kratkega stika	0,043
$R_{BR,B}$ (Ω) – upornost bremena	330

Table 13: Meritve za izračun Nortonove upornosti vira B.

Nortonovo upornost vira B nam podaja enačba (33)

$$R_{N,B} = \frac{U_{BR,B} - U_{KS,B}}{I_{KS,B} - I_{BR,B}} = 2,47 \text{ M}\Omega \quad (33)$$

Iz meritev je razvidno, da je dosežena natančnost merjenja precej višja od teoretično določene. To je posledica dejstva, da smo pri teoretičnem izračunu upoštevali največje možne napake, s časom se vrednosti elementov vezja (vključno z napetostnimi referencami) spreminjajo, zato se tudi natančnost slabša, a vendar mora ta ostati znotraj meja, ki smo jih teoretično izračunali.

Theveninovi upornosti virov A in B se med seboj kljub enaki konstrukciji precej razlikujeta. To razliko si razlagamo kot posledico merjenja, saj lahko vir B obremenimo le z desetkrat manjšim tokom kot vir A, kar pomeni manjši padec napetosti na Theveninovi upornosti in s tem težje merjenje le-te. Poleg tega se pojavijo razlike pri različnih vezavah merilnikov, kar še dodatno vpliva na slabo natančnost merjenja Theveninove upornosti.

Nortonovi upornosti tokovnih virov, še posebej pri viru A, sta nizki. To je posledica končne vrednosti faktorja CMRR instrumentacijskih ojačevalnikov, ki merijo izhodni tok. Ti dve upornosti smo izmerili pri izhodni napetosti približno 2,5V, ker je to tudi v programu določena meja napetosti, pri kateri se tokovni vir smatra za nasičenega.

6 Zaključek

Cilj diplomske naloge je bila izdelava prilagodljivega merilnega sistema, ki bi nudil obilo možnosti za natančno merjenje karakteristik različnih dvo- in tri-polnih polprevodniških elementov. Pomembna zahteva je bila, da ima sistem sposobnost samokalibracije in da omogoča izvajanje različnih eksperimentov na testiranem elementu. Sistem s takimi lastnostmi bi bil uporaben predvsem v pedagoške namene, hkrati pa bi bil uporaben tudi v laboratoriju ali pa kot sistem za preverjanje kakovosti polprevodniških elementov. Te cilje smo želeli doseči s čim manj stroški.

Enostavno povezljivost z osebnim računalnikom in s tem obilo možnosti programskih razširitev omogoča USB vmesnik, ki smo ga izvedli s pomočjo eProDas sistema. Strojna oprema je zgrajena tako, da omogoča praktično poljubno kombinacijo vzbujanja in merjenja testiranih elementov, kar zagotavlja načrtovano prilagodljivost. Le-to smo demonstrirali z implementacijo avtomatskega prepoznavanja nekaterih polprevodniških elementov, vključno z identifikacijo razporeda njihovih priključnih sponk.

Nizko ceno sistema smo dosegli hkrati s sposobnostjo njegove samokalibracije. Uporaba 24-bitnega AD pretvornika je v kombinaciji s programsko izvedeno kalibracijo omogočila gradnjo sistema, v splošnem sestavljenega iz cenениh neprecizijskih elementov. Dosežena natančnost merjenja povsem ustreza področju uporabe merilnega sistema – največ $\pm 0,04\%$ pogreška pri napetostnih meritvah in $\pm 1,26\%$ pogreška pri tokovnih meritvah. Uporabniku je omogočeno enostavno delo s sistemom in obilo možnosti obdelave izmerjenih karakteristik zahvaljujoč uporabniškemu vmesniku, izdelanemu v programskem paketu MATLAB.

7 Literatura

1. PIC18F2455/2550/4455/4550, Data Sheet,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632D.pdf>, 30. januar 2007
2. eProDas Data Acquisition system, User's guide and programming manual,
http://lie.fe.uni-lj.si/eProDas/eProDas_Version_1_0.pdf, 21. december 2007
3. 12-Bit Serial Input DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER DAC7611,
<http://www.ti.com/lit/gpn/dac7611>, 27. september 2000
4. 24-Bit ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER ADS1211,
<http://www.ti.com/lit/gpn/ads1211>, 8. september 2005
5. BAT85 Schottky barrier diode, http://www.nxp.com/acrobat/datasheets/BAT85_4.pdf, 25. maj 2000
6. 2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI™ Serial Interface MCP3208,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298D.pdf>, 31. januar 2007
7. ULN2803A, Eight Darlington arrays,
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/1536/uln2803a.pdf>, september 2003
8. LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers,
<http://www.national.com/ds.cgi/LM/LM158.pdf>, 21. oktober 2005
9. MAXIM Quad, SPST Analog Switches, DG308A/DG309, <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DG308A-DG309.pdf>, marec 1991
10. CD4066BC Quad Bilateral Switch, <http://www.fairchildsemi.com/ds/CD%2FCD4066BC.pdf>, oktober 2005
11. Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620,
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/37793330023930AD620_e.pdf, julij 1999
12. Precision, Micropower, Single Supply Instrumentation Amplifier LT1101,
<http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1154,C1009,C1045,P1691,D1852>
13. Voltage-to-current converter makes a flexible current reference,
<http://www.edn.com/article/CA321804.html>, 18. september 2003

14. BD135/137/139 Medium Power Linear and Switching Applications,
<http://www.fairchildsemi.com/ds/BD/BD135.pdf>, februar 2000
15. BD136/138/140 Medium Power Linear and Switching Applications,
<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/gelisim/elektronik/dosyalar/40/BD140.pdf>, februar 2000
16. BC846- BC850 NPN Epitaxial Silicon Transistor,
<http://www.fairchildsemi.com/ds/BC/BC847.pdf>, avgust 2006
17. BC856- BC860 PNP Epitaxial Silicon Transistor,
<http://www.fairchildsemi.com/ds/BC/BC857.pdf>, avgust 2006
18. Small Signal Diode BAS16, <http://www.fairchildsemi.com/ds/BA%2FBAS16.pdf>
19. Advanced Power MOSFET IRF530A, <http://www.fairchildsemi.com/ds/IR/IRF530A.pdf>
20. Surface Mount Glass Passivated Silicon Rectifier SM4001 thru SM4007,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/RECTRON/SM4001.pdf>, april 2001
21. Ultralow Noise, LDO XFET Voltage References with Curent Sink and Source, ADR440/
ADR441/ADR443/ADR444/ADR445,
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADR440_441_443_444_445.pdf,
marec 2008
22. FilterLab Filter Design Software, http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010007, 27. april 2008
23. Universal Serial Bus Revision 2.0 specification,
http://www.usb.org/developers/docs/usb_20_040908.zip, 9. april 2008
24. Solid state relay, http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_state_relay

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca, univ. dipl. inž. el. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Jernej Škvarč