

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

**MERJENJE KARAKTERISTIKE FOTONAPETOSTNEGA MODULA S
PRINCIPOM POLNJENJA KONDENZATORJA**

Tematsko področje: Elektrotehnika, elektronika in robotika

Avtor:
Matic Knap, 4. letnik

Mentor:
dr. Gregor Černivec, univ. dipl. inž. elektrotehnike

Velenje, 2010

Raziskovalna naloga je bila opravljena v sodelovanju s podjetjem Bisol, d.o.o.

Mentor: dr. Gregor Černivec, univ. dipl. inž. elektrotehnike

Datum predavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠCV-ERŠ, 2009/2010

KG kondenzator/ meritve/ solar/ PV/

AV KNAP, Matic

SA dr. ČERNIVEC, Gregor

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

ZA Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

LI 2010

IN MERJENJE KARAKTERISTIKE FOTONAPETOSTNEGA MODULA S PRINCIPOM
POLNJENJA KONDENZATORJA

TD RAZISKOVALNA NALOGA

OP VI, 45, 26,15,1,20

IJ sl

JI sl/en

Nadzor izplena in degradacije fotonapetostnih modulov narekuje potrebo po točnem, hitrem ter enostavnem merilnem principu. Z idejno zasnovo merilnika, kjer uporabimo optično ločitev merilnega in močnostnega dela ter digitalni prenos podatkov do osebnega računalnika, zadostimo zgoraj navedenim zahtevam. Idejno zasnovo analognih merilnih sklopov smo potrdili s simulacijami v programskem okolju PSpice, medtem ko smo digitalne sklope opisali v obliki diagramov poteka izvajanja programa.

Stacionarno merjenje karakteristike modula z nastavlјivim bremenskim uporom je zamudno in neuporabno pri večjih močeh oz. več zaporednih meritvah, saj dispacija moči na komponentah merilnika in/ali fotonapetostnega modula povzroča sistematsko napako. Alternativa temu načinu meritve je princip polnjenja kondenzatorja, pri katerem se zaradi kratkega časa meritve sprosti majhna količina energije, ki se shrani v bremenskem kondenzatorju.

Merilnik se lahko uporablja za merjenje karakteristike sončne celice, fotonapetostnega modula ali niza modulov le s spremembo napetostnega delilnika, bremenskega kondenzatorja in merilnika toka. Točnost merilnika je ob pravilni spremembi teh parametrov neodvisna od velikosti merjene veličine.

Prednost takšnega merilnika je, da bo majhen, cenen, dokaj enostavne izdelave in primeren za pritrditev na hrbtni strani fotonapetostnega modula. Komunikacija v realnem času bo omogočala hiter in enostaven vpogled trenutnih izhodnih karakteristik modula ali niza modulov in s tem določevanje kvalitete sistema ali pa spremljanje izhodnih veličin skozi daljše časovno obdobje z namenom določitve stopnje degradacije fotonapetostnega modula.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND ŠCV-ERŠ, 2009/2010

CX capacitor / measurement / PV / solar

AU KNAP, Matic

AA dr. ČERNIVEC, Gregor

PP 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

PB Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

PY 2010

TI MEASURING OF CHARACTERISTIC OF PHOTOVOLTAIC MODULE BASED ON
PRINCIPLE OF CHARGING CAPACITOR

DT secondary school research work

NO VI, 45, 26,15,1,20

LA sl

AL sl/en

AB The control of the energy yield and the degradation of photovoltaic modules require a precise, fast and simple measuring principle. We can meet the above mentioned requirements by means of the outline scheme of a measuring device, where we use the optical separation of the measuring set and power set with digital data transmission to personal computer. The outline scheme of analogue measuring sets was confirmed by the simulations with PSpice, whereas the digital sets were described with a code flow diagram.

The stationary measuring of the PV module characteristic with variable load is time-consuming and of no use at higher power because of the dissipation on the measuring device components. The power dissipation causes systematic errors. The alternative is the principle of measuring the PV module characteristic based on the principle of charging the capacitor. The power dissipation is small due to short time and the released energy is stored in the capacitor.

The measuring device is used for measuring the characteristic of a solar cell, a photovoltaic module or arrays of modules only with the change of the configuration of the voltage divider, capacitor and ammeter. The accuracy of the device is at the right change of these configurations independent of the size of the measured unit.

The advantage of the device is that it will be small, cheap, with simple design and suitable to be attached to the back of the PV module. The communication in real time will enable a fast and simple insight in the degradation of the solar system. We will be able to set up the quality system or monitor the output units over a longer period of time with the purpose to determine the degree of the PV module degradation.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VI
KAZALO GRAFOV	VI
TABELE	VI
1. UVOD	1
2. SONČNA CELICA in FOTONAPETOSTNI MODUL	3
2.1 Sončna celica.....	3
2.1.1 Delitev sončnih celic ter njihov izkoristek.....	3
2.2 Delovanje ter električne lastnosti sončnih celic.....	5
2.2.1 Model sončne celice.....	5
2.3 Določanje in merjenje karakteristike sončnih celic	7
2.4 Fotonapetostni modul.....	10
2.5 Princip meritve karakteristike z uporom in kondenzatorjem.....	12
2.5.1 Ocena napake	14
3. MERILNI PODSKLOPI.....	17
3.1 Procesorski sklop	18
3.1.1 Diagram poteka izvajanja programa	21
3.2 Močnostni sklop.....	22
3.2.1 Napetostni delilnik	22
3.2.2 Referenčna sončna celica	23
3.2.3 Krmiljenje meritve	23
3.3 Merilni sklop.....	24
3.3.1 Merilnik toka.....	25
3.3.2 Optična ločitev	27
3.3.3 Diferencialni ojačevalnik	30
3.3.4 Senzor temperature	30
4. REZULTATI in IZSLEDKI.....	32
4.1 Princip meritve karakteristike s principom polnjenja kondenzatorja.....	33
4.2 Princip meritve polnjenja kondenzatorja je hitrejši kot uporovni način	35
4.3 Razširitev merilnega območja merilnika	37
4.4 Optična ločitev močnostnega in merilnega dela vpliva na točnost merilnika.....	38
4.5 Meritev bo natančnejša, če se izvaja v neposredni bližini fotonapetostnega modula, prenos podatkov pa poteka v digitalni obliki.....	40
5. RAZPRAVA – Merilnik kot del nadzornega sistema	42
6. ZAKLJUČEK.....	43
7. ZAHVALA.....	43
8. PRILOGA: Shema vezja merilnika.....	44
9. REFERENCE.....	46

KAZALO SLIK

Slika 1: Model nadomestnega vezja sončne celice.	5
Slika 2: Prerez zgradbe modula.	10
Slika 3: Fotonapetostni modul.	10
Slika 4: Princip merjenja U-I karakteristike z nastavljenim bremenom.	12
Slika 5: Princip merjenja U-I karakteristike s kondenzatorjem.	13
Slika 6: Shema principa meritev.	14
Slika 7: Blok shema merilnika.	17
Slika 8: ATmega16.	18
Slika 9: Pulzno širinska modulacija.	19
Slika 10: Integrator.	19
Slika 11: SPI povezava z gospodarjem in služabnikom.	20
Slika 12: Diagram poteka izvajanja programa.	21
Slika 13: Shema močnostni sklop.	22
Slika 14: Delilnik napetosti.	22
Slika 15: Princip delovanja MOSFET tranzistorja.	23
Slika 16: Merilni sklop merilnika.	24
Slika 17: Vpliv magnetnega polja na vodnik pod napetostjo.	25
Slika 18: Tokovni merilnik Allegro ASC712.	26
Slika 19: Padec napetosti zaradi prevelike upornosti mase.	27
Slika 21: Linearni optosklopnik IL300.	27
Slika 22: Operacijski ojačevalnik.	28
Slika 23: Shema izolacijskega ojačevalnika.	28
Slika 20: Optična ločitev MOSFET-a z analognim optosklopnikom.	29
Slika 24: Diferencialni ojačevalnik.	30
Slika 25: Shema mostične vezave senzorja temperature z diferencialnim ojačevalnikom.	31
Slika 26: Razlika v času med principoma.	35

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Vpliv serijske upornosti na U-I karakteristiko sončne celice.	7
Graf 2: Vpliv paralelne upornosti na karakteristiko sončne celice.	8
Graf 3: Vpliv temperature sončne celice na karakteristiko.	9
Graf 4,5: Vpliva faktorja idealnosti in toka zaporne smeri diode izrisana v logaritemskem merilu.	9
Graf 6: Karakteristika dveh FN modulov s 60 sončnimi celicami.	11
Graf 7: Časovni potek principa merjenja U-I karakteristike s kondenzatorjem.	13
Graf 8: Karakteristika simulacije in matematičnega modela.	34
Graf 9: Polnjenje kondenzatorja.	35
Graf 10: Zakasnitev povprečevanja.	36
Graf 11: Meritev karakteristike FN modula.	37
Graf 12: UI karakteristika FN modul.	38
Graf 13: Vpliv padca napetosti na masi točnost merilnika.	39
Graf 14: Vpliv inducirane napetosti na analogni signal.	40
Graf 15: Vpliv inducirane napetosti na digitalni signal.	41

TABELE

Tabela 1: Zakasnitveni čas integratorja.	36
---	----

1. UVOD

Raziskovalna naloga je nastala zaradi naraščajoče potrebe po metrologiji fotonapetostnih (FN) modulov v pogojih zunanjega sončnega obsevanja in temperatur. Zaradi vedno večje aktualnosti sončnih elektrarn in s tem povezanih vložkov, se te večinoma obravnavajo kot investicija z vnaprej določeno vračilno dobo. Vračilna doba investicije je v neposredni povezavi z izplenom sončne elektrarne na stičnem mestu z omrežjem. Izplen na stičnem mestu z omrežjem je odvisen od izkoristka pretvorbe FN modulov in izkoristka pretvorbe ostalega sistema. Ker želijo imeti naročniki zavarovano investicijo, se v zadnjem času vse bolj uveljavlja model zagotovljenega izplena. Če želijo ponudniki sončnih elektrarn zagotoviti izplen, morajo imeti natančen vpogled v delovanje in degradacijo sistema. Izplen na stičnem mestu je produkt izplena na sponkah FN modula in izkoristka pretvorbe ostalega sistema. Izkoristek pretvorbe ostalega sistema je relativno lahko določiti z enostavnim merjenjem enosmernih električnih veličin na vseh razsmernikih in izmeničnih električnih veličin na stičnem mestu. Po drugi strani pa je mnogo bolj zapleteno izmeriti degradacijo FN modulov in s tem ugotoviti, ali je ta v ustreznih tolerancah, kot jih je definiral proizvajalec. V kolikor je degradacija FN modulov višja od tiste, ki jo zagotavlja proizvajalec, lahko ponudnik sončne elektrarne ustrezno prenese stroške nezagotavljanja izplena na proizvajalca FN modulov. Ključno vlogo pri tem pa ima ustrezni merilnik karakteristike FN modula.

Predmet raziskovalne naloge je idejna zasnova merilnika karakteristike FN modula, ki bo nameščen v neposredni bližini modula in bo pošiljal podatke o meritvi računalniku, tako da bo možna meritev v realnem času. Idejna zasnova merilnika obsega določitev principa meritve, blokovno shemo merilnika, detajlno električno shemo merilnika in določitev pričakovane napake meritve. Pomembni deli zasnove predstavljajo električne simulacije posameznih podsklopov merilnika. Klasična meritev $U-I$ karakteristike obsega obremenjevanje generatorja z nastavljenim bremenom ter hkratno merjenje toka in napetosti. Navadno je taka meritev zamudna, vedno pa je prisotna znatna dispacija moči, ki vpliva na natančnost meritve. Alternativa temu načinu je transformacija stacionarnega nastavljanja bremena v časovni prostor polnjenja kondenzatorja. Pri tej metodi med sponki solarnega modula vezemo zaporedno kondenzator ter stikalo. Ko stikalo sklenemo, s časovnim vzorčenjem hkratno merimo tok in napetost kondenzatorja. Ker se energija fotonapetostnega (FN) modula le prenese v kondenzator, je segrevanje komponent minimalno, s čimer zmanjšamo temperaturno napako meritve. Sama časovna zahtevnost meritve pa je zmanjšana zgolj na polnjenje kondenzatorja.

Cilj raziskovalne naloge je razvoj principa meritve, sheme ter simulacije podsklopov merilnika. Princip meritve bomo evalvirali z modelom FN modula in bremenskega kondenzatorja v simulacijskem okolju Pspice. Merilni podsklopi bodo optično ločeni od generatorja, pri čemer bomo uporabili principa izolacijskega in instrumentacijskega ojačevalnika, ki ju bomo izdelali iz cenejših ojačevalnikov in optosklopnikov. Merilne podsklope bomo preverili v simulacijskem okolju Pspice. Določili bomo napako meritve.

V uvodu smo predstavili sledeče hipoteze:

- Princip merjenja karakteristike FN modulov s polnjenjem kondenzatorja je ustrezen.
- Princip meritve s polnjenjem kondenzatorja je hitrejši kot uporovni način.
- Meritev bo natančnejša (ponovljivost), če se izvaja v neposredni bližini FN modula, prenos podatkov pa poteka v digitalni obliki.
- Optična ločitev močnostnega in merilnega dela vpliva na točnost meritve.
- Merilnik se bo lahko uporabljal za merjenje posameznih sončnih celic, posameznih FN modulov in nizov FN modulov le s spremembo dopustnih parametrov izhodnih elementov.

2. SONČNA CELICA in FOTONAPETOSTNI MODUL

2.1 Sončna celica

Sončna celica je naprava, ki pretvarja svetlobno energijo fotonov neposredno v električno energijo. Takšen pojav se imenuje fotoefekt. Prvi je opazil ta pojav Francoski fizik A. E. Becquerel, vendar je bila prva celica izdelana šele 44 let kasneje. Izdelal jo je C. Fritts, kateri je obložil polprevodniški selen z zelo tanko plastjo zlata in tako oblikoval polprevodniški spoj. Njen izkoristek je bil le okoli 1%. Čez nekaj let je H. Hertz odkril zunanji fotoelektrični pojav, na katerem je ruski fizik A. Stoletov zgradil prvo sončno celico. Prva celica z izboljšanim polprevodniškim spojem je bila narejena v letu 1946 s strani R. Ohla, kateri jo je razvil med tem, ko je delal na materialih, ki bi vodili do tranzistorja [1].

2.1.1 Delitev sončnih celic ter njihov izkoristek

Vrste sončnih celic so povezane z uporabljenimi polprevodniškimi materiali in tehnologijami. Delimo jih na:

- Monokristalne silicijeve sončne celice

To so sončne celice iz kremenčevega peska in imajo najvišji izkoristek, saj dosegajo v laboratorijskih pogojih izkoristke do 25 %, v serijski proizvodnji pa med 15 in 17,5 %. Postopek je časovno potraten, saj je rast kristala počasna, zahteva izredno čisto talino in natančno izdelavo in veliko rabo energije. Izdelavo monokristalnih sončnih celic pocenimo s postopkom rasti kristala v obliki tankega traku, ki ga z laserjem razrežejo v rezine. Tako oblikovane sončne celice tudi bolje zapolnijo module, brez praznih prostorov, ki so značilni za module z okroglimi monokristalnimi sončnimi celicami, izdelanih iz ingota [2].

- Polikristalne silicijeve sončne celice

so sestavljene iz večjega števila kristalov. Izdelava je cenejša. Izkoristki polikristalnih celic v laboratorijskih pogojih dosegajo do 21 %, serijski proizvodi pa med 13,5 in 16,5 %. Namesto rasti kristala, ki je značilna za monokristalne sončne celice, v tem primeru ohlajamo silicijevo talino v kvadratnih blokih. Zaradi neenakomernega ohlajanja se v blokih tvorijo ločeni kristali [2].

- Polikristalne tankoslojne silicijeve celice

Mono in polikristalne celice so debele nekaj sto mikronov, da zagotovimo dobro absorpcijo fotonov. S posebno tehniko »lovljenja« fotonov so dosegli odlično absorpcijo fotonov že pri debelinah polikristalnega silicija okoli 20 μm , nanesenega na keramično podlago. Učinkovitost celic je primerljiva s klasičnimi polikristalnimi silicijevimi celicami, njihova cena pa zaradi manjše porabe materiala in enostavnejšega postopka izdelave nižja. Ta tip sončnih celic trenutno še ni dosegel serijske proizvodnje [2].

- Polikristalne celice iz galijevega arzenida

Galijev arzenid je tako imenovan sestavljen polprevodnik s strukturo podobno siliciju, vendar vsebuje galijeve in arzenove atome. Ker je dober absorber, so lahko celice tanke, imajo višjo zaporno napetost in zato večji izkoristek (do 20%). Ker se z naraščanjem temperature celice izkoristek skoraj ne zmanjšuje, so primerne za FN sisteme s koncentradorji (na primer Fresnelovimi lečami). Dražje so zaradi postopka izdelave in redkosti galija in arzena [2].

- Amorfnе silicijeve (*a-Si*) sončne celice

Narejene so iz amorfnega silicija z dodatkom vodika. Izdelava *a-Si* celic je precej cenejša kot izdelava kristalnih in energetsko varčnejša. Izkoristki dosežejo v laboratorijskih pogojih do 12%, v serijski proizvodnji pa med 5% in 7% izkoristek. Glavna slabost celice je svetlobna degradacija in s tem povezano zmanjševanje izkoristka. Tako se že po nekaj mesecih izkoristek zmanjša na 4% [2].

- Tankoslojne celice iz baker-indijevega-diselenida (CuInSe_2 ali CIS) in kadmijevega-telurida (CdTe)

To so tankoslojne celice z relativno visokim izkoristkom (med 10% in 19% v laboratorijskih razmerah), ki se s časom ne zmanjšuje kot je to značilno za celice iz amorfnega silicija. Podobno kot amorfne silicijeve sončne celice tudi te zelo dobro absorbirajo fotone. Indij, ki ga uporabljamo v CIS celicah, je drag material, vendar so potrebne zelo majhne količine tega elementa. Kadmij, ki ga uporabljajo v CdTe celicah, je strupen, zato mora biti proizvodnja, uporaba in odlaganje uničenih modulov nadzorovana [2].

2.2 Delovanje ter električne lastnosti sončnih celic

Sončna celica je elektrokemični generator, ki nizkoenergijske valenčne elektrone s pomočjo fotonov pretvori v mobilne elektrone z višjo energijo, ki lahko generirajo električni tok. Sončna celica je v osnovi polprevodniška dioda z veliko površino, zgrajena iz najmanj dveh tankih plasti silicija. Ena plast ima presežek elektronov, imenujemo jo polprevodnik tipa N. Drugi plasti tipa P primanjkujejo elektroni (ima presežek vrzeli). V osvetljeni sončni celici se generira(jo) par(i) elektron-vrzel(i). Električno polje loči in povleče elektrone iz prehodnega področja v polprevodnik tipa N in vrzeli v polprevodnik tipa P. Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na kontaktih, ki ob priključitvi porabnika požene električni tok.

Do pretvorbe energije svetlobe v električno energijo (tok in razlike potencialov) prihaja zaradi fotonapetostnega pojava. Pri vpadu fotonov na kristalno mrežo polprevodnika fotoni oddajo svojo energijo kristalni mreži in če je energija dovolj velika, ta pojav povzroča nastajanje prostih valenčnih elektronov. Energija kvantov je odvisna od valovne dolžine svetlobe oz. elektromagnetnega valovanja. Od tega je tudi odvisno število sproščenih elektronov. Prosti elektroni bodo nastali le v primeru, če bo energija vpadnih fotonov enaka ali večja od energijske širine med valenčnim in prevodnim pasom. Energija vpadnih fotonov je odvisna od frekvence in je podana z znano enačbo o energiji elektromagnetnega valovanja

$$E = h \cdot \nu$$

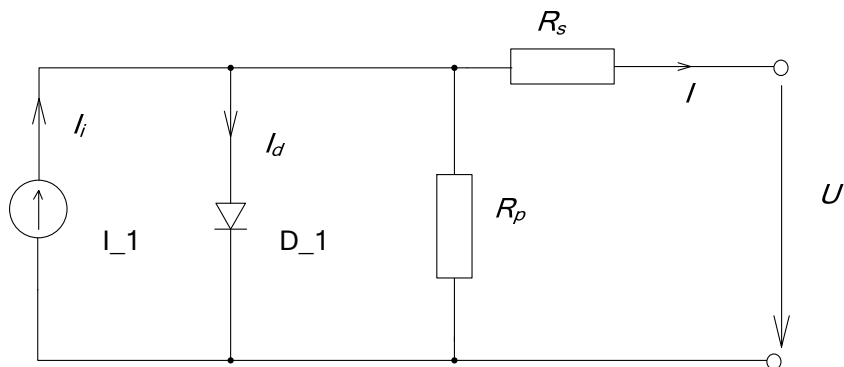
$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2,$$

kjer je h Planckova konstanta in ν frekvenca.

Zaradi odvisnosti od frekvence so primerni fotoni višjih frekvenc oz. nižjih valovnih dolžin, kateri imajo dovolj visoke energije, da nastanejo prosti elektroni.

2.2.1 Model sončne celice

Ker je sončna celica polprevodniška dioda, lahko njeno delovanje predstavimo z modelom osnovnih elektronskih elementov, kot so tokovni generator, dioda, ter upor. Model z ekvivalentnimi lastnostmi sončne celice je sestavljen iz diode, vzporedno vezanega tokovnega generatorja, paralelnega ter zaporednega upora.



Slika 1: Model nadomestnega vezja sončne celice.

Tok skozi sponke je po Kirchhoffovemu zakonu enak:

$$I = I_i - I_d - I_p \quad (1)$$

Tok skozi te elemente povzroči padce napetosti in sicer:

Napetost na diodi in paralelnem uporu je enaka produktu paralelnega upora ter toka, ki teče skozenj. Po prvem Kirchhoffovem zakonu je ta napetost enaka za diodo in lahko zapišemo napetost na diodi in paralelnem uporu (U_{pd}) kot

$$U_{pd} = I_p \cdot R_p \quad (2)$$

Kadar teče tok skozi serijski upor R_s , povzroča padec napetosti, katera povzroča razliko napetosti med napetostjo sponk in napetostjo diode ter paralelnega upora;

$$U = U_{pd} - I \cdot R_s \quad (3)$$

Tok skozi diodo lahko izračunamo po diodnem zakonu ali drugače po Shockleyevi enačbi idealne diode:

$$I_d = I_z \left(e^{\frac{q_0 \cdot U_{pd}}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right), \quad (4)$$

kjer je:

I_z – tok v zaporni smeri diode, povzročen z difuzijo manjšinskih nosilcev iz nevtralnega v osiromašeno področje; tok je skoraj neodvisen od napetosti v zaporni smeri

q_0 – osnovni naboj

n – faktor idealnosti diode, ki je odvisen od proizvodnje ter materiala, ki se giblje med 1 in 2, vendar največkrat predpostavimo, da je 1

k – Boltzmanova konstanta

T – absolutna temperatura.

Te enačbe in poznavanje vezja modela bodo zelo pomembni pri določanju karakteristike sončnih celic in FN modulov pri meritvah.

2.3 Določanje in merjenje karakteristike sončnih celic

Ker so sončne celice polprevodniške diode, je za sončne celice značilna »diodna karakteristika«. Ta povezuje razmerje med tokom in napetostjo ob različnih električnih upornostih tokokroga, ki spaja elektrodi sončne celice. Pri karakteristiki sončnih celic so zelo pomembne naslednje vrednosti:

P_v – vršna moč, to je delovna moč s katero sončna celica dela

U_v – napetost vršne moči

I_v – tok vršne moči

V_{os} – tok odprtih sponk sončne celice

I_{ks} – kratkostični tok

FF – faktor polnjenja krivulje diodne karakteristike sončne celice

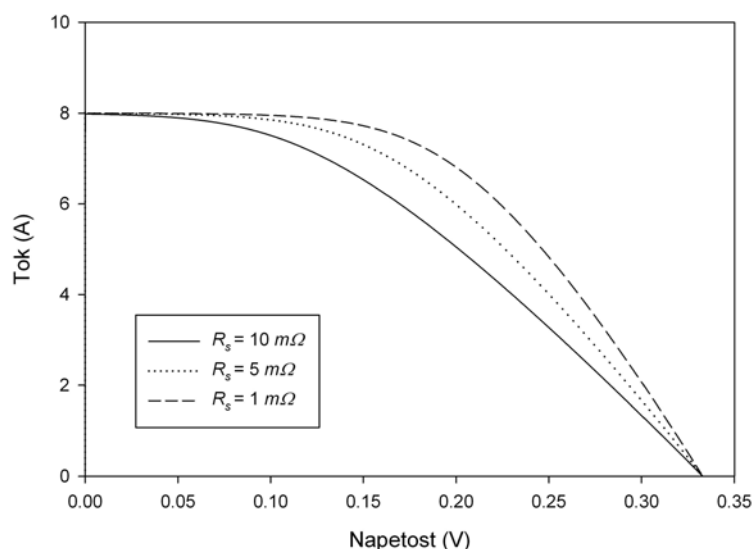
T_s – temperatura sončne celice

G – gostota svetlobnega sevanja na sončni celici, izmerjena z referenčno sončno celico ali piranometrom.

Medsebojne odvisnosti teh vrednosti nam podajajo nedvoumen vpogled v karakteristiko celic. Skoraj celotno karakteristiko lahko preberemo iz U - I krivulje, katera je odvisna od R_s , R_p , G in T . Vpliv teh veličin na karakteristiko je specifičen glede na spremenljivko.

- Vpliv notranje serijske upornosti (R_s)

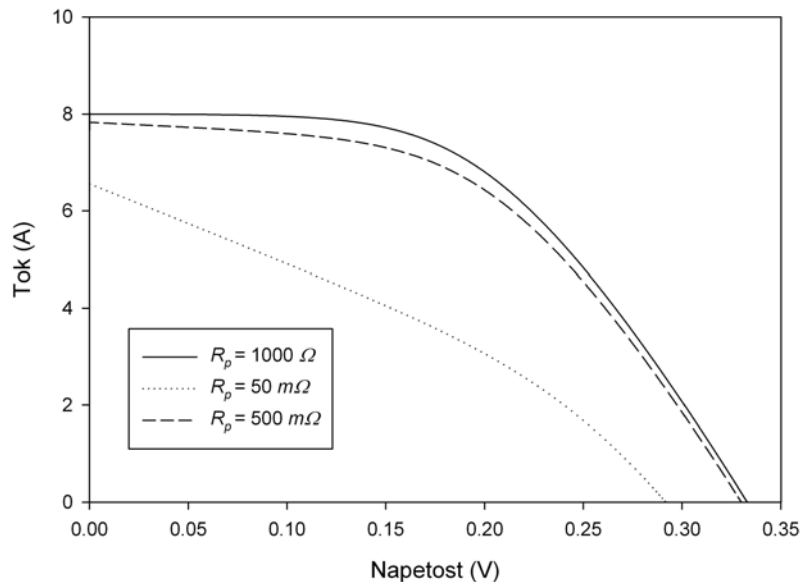
Serijska upornost poveča padec napetosti med napetostjo diode ter paralelnega upora in napetostjo sponk pri enakem toku. S tem se tokovni del I - U krivulje pomakne proti izhodiščni točki in zmanjša napetost vršne moči (U_v) ter zelo malo kratkostični tok (I_{ks}). Zelo velike vrednosti R_s bi »pokvarile« krivuljo in povzročile, da bi se sončna celica obnašala kot navaden upor. Izgube zaradi serijske upornosti (R_s) so podane z $P_{izg} = I^2 R_s$ in se kvadratno višajo s tokom celice. Tako so izgube serijske upornosti zelo pomembne pri veliki gostoti svetlobnega sevanja.



Graf 1: Vpliv serijske upornosti na U - I karakteristiko sončne celice.

- Vpliv notranje paralelne upornosti (R_p)

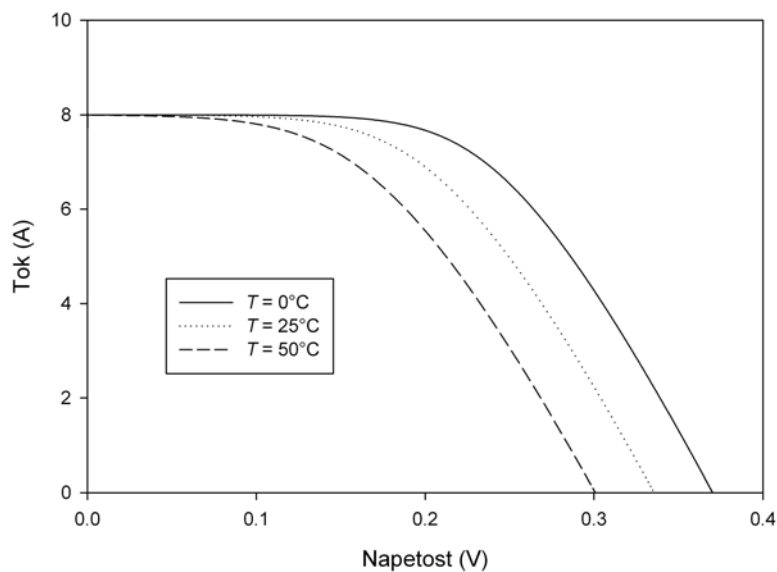
Zmanjšanje paralelne upornosti poveča tok skozi paralelni upor za določeno velikost napetosti. Napetostni del U - I krivulje se pomakne k izhodišču, tok sponk in tok vršne moči (I_v) se zmanjšata, malo se zmanjša napetost odprtih sponk (U_{os}). Zelo majhna vrednost paralelnega upora povzroči velik padec napetosti odprtih sponk. Ko preseže paralelna upornost določeno vrednost, ima sončna celica spet karakteristiko navadnega ohmskega upora, enako kot v primeru serijskega upora [5].



Graf 2: Vpliv paralelne upornosti na karakteristiko sončne celice.

- Vpliv temperature sončne celice

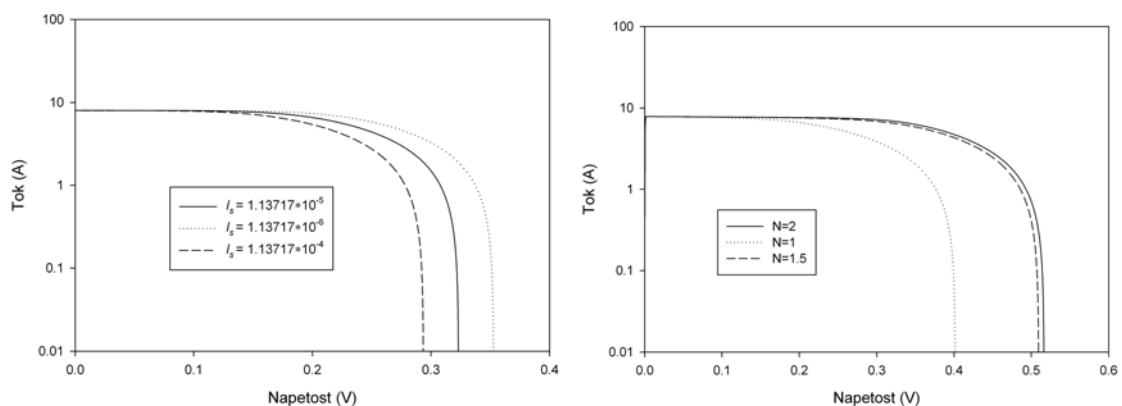
Z višanjem temperature se tok nasičenja eksponencialno viša. S tem se posledično linearno s temperaturo niža napetost odprtih sponk. Velikost te spremembe je obratno sorazmerna z napetostjo odprtih sponk. To pomeni, da imajo celice z višjimi napetostmi odprtih sponk nižje spremembe napetosti glede na temperaturo. Glavni vpliv temperature na izkoristek celice se lahko izračuna z uporabo teh faktorjev s kombinacijo karakteristične enačbe. Kadar so spremembe napetosti veliko večje kot spremembe toka, je vpliv na izkoristek enak kot vpliv na napetost [3].



Graf 3: Vpliv temperature sončne celice na karakteristiko.

- Vpliv toka zaporne smeri in faktorja idealnosti

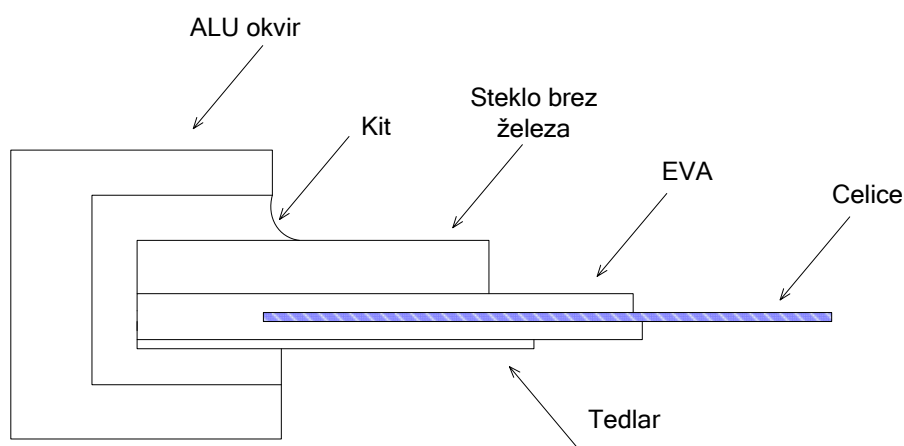
Tok zaporne smeri in faktor idealnosti imata enak vpliv na karakteristiko sončne celice in sta oba odvisna od izdelave ter materiala celice. Faktor idealnosti nam pove, kako blizu je dioda idealni diodi. Faktor idealnosti je lahko med 1 in 2. S povečevanjem faktorja se večja tudi napetost odprtih sponk celice. Tok zaporne smeri diode zmanjša napetost odprtih sponk. Skupni učinek teh dveh vplivov na karakteristiko sončne celice je, da je v večini primerov vpliv toka zaporne smeri večji in se napetost odprtih sponk zaradi tega zmanjša [7].



Graf 4,5: Vpliva faktorja idealnosti in toka zaporne smeri diode izrisana v logaritemskem merilu.

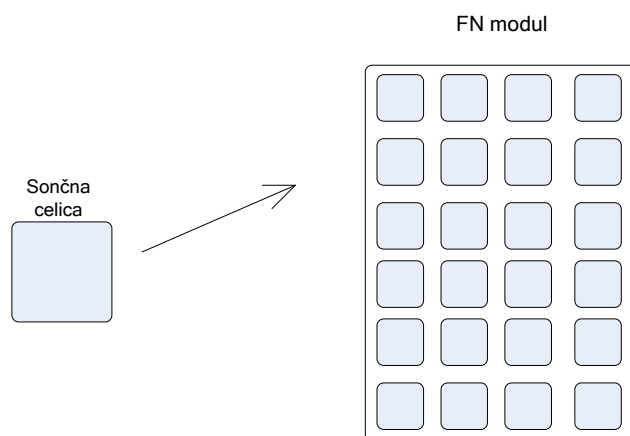
2.4 Fotonapetostni modul

Za sončne celice je značilno, da proizvajajo enosmerni tok nizke napetosti ($0,5V - 0,7V$). Da bi lahko s celicami oskrbovali standardna nizkonapetostna trošila (običajno $12V$), moramo več celic med seboj povezati v serijo. Ker so celice krhke, zaradi cene pa mora biti doba delovanja dolga, vstavimo celice v module. Najpogostejše module sestavijo iz sloja toplotno in mehansko odpornega stekla ter Tedlar folije. Med njima so v enkapsulacijsko snov (npr. EVA-etil vinil acetat) zalite sončne celice. Enkapsulacijska snov preprečuje oksidacijo, vdor zračne vlage in zagotavlja odpornost pred UV (ultravijoličnim) sončnim spektrom. Stekli sta s strani zatesnjeni z nosilnim kovinskim okvirjem.



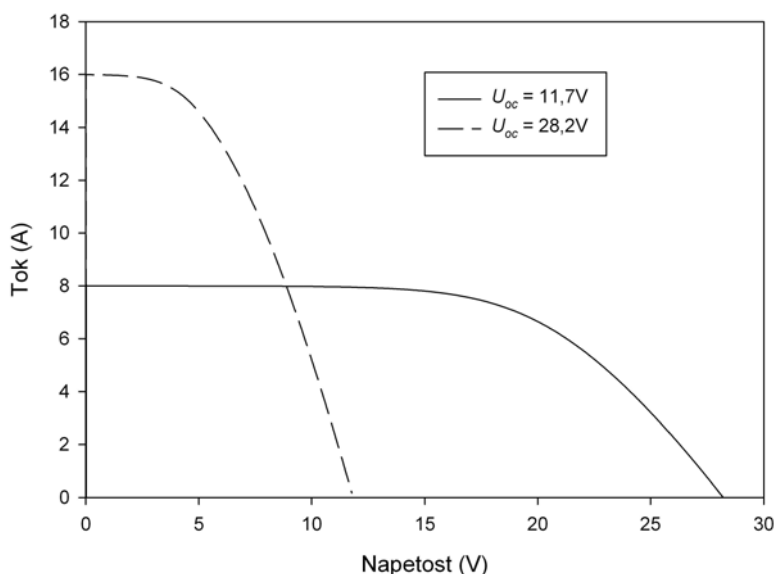
Slika 2: Prerez zgradbe modula.

Ker so celice vezane v seriji, teče enak tok skozi vse celice. Samo ena slaba celica (z veliko upornostjo) bi vplivala na lastnosti celotnega modula. Zato so vse celice pred enkapsulacijo testirane, v modul pa vgrajene tiste z enako karakteristiko. Nizi celic, ki vsebujejo dvajset celic, so opremljeni z obtočno diodo, ki preprečuje, da bi okvara posameznega niza celic vplivala na funkcionalnost modula; po drugi strani pa obtočna dioda preprečuje pregrevanje (ang. hot-spot efekt) niza celic, ki so osenčene in imajo zato veliko električno upornost.



Slika 3: Fotonapetostni modul.

Moduli so sestavljeni iz celic, zato imajo prav tako diodno karakteristiko. Ta pa ni odvisna le od karakterističnih vplivov sončne celice. Moč modula je odvisna od seštevka moči posameznih celic. Napetost odprtih sponk FN modula je vsota napetosti odprtih sponk zaporedno vezanih sončnih celic, medtem ko je kratkostični tok FN modula vsota kratkostičnih tokov vzporedno vezanih celic. Zaporedna vezava celic v modul poveča serijsko upornost FN modula, vzporedna vezava pa njegovo paralelno prevodnost. Vplivi temperature, faktorja idealnosti in toka zaporne smeri so neodvisni od vezave celic, z enakim vplivom na karakteristiko FN modula kot na karakteristiko sončne celice.



Graf 6: Karakteristika dveh FN modulov s 60 sončnimi celicami vezanimi zaporedno $U_{oc}=28,2V$, in zaporedno vezanih skupin vzporedno vezanih celic $U_{oc}=11,7$.

Moduli so preizkušeni po mednarodnih standardih (*IEC 61215*, *IEC 61646* in *IEC 61730*), ki veljajo za sončne celice [2]. Kakovost modula določijo proizvajalci, ki jih testirajo v posebnih komorah s STC (standardnimi pogoji testiranja; faktor zračne mase $AM=1,5$; gostota sončnega sevanja $G=1000W/m^2$; sobna temperatura $T=25^{\circ}C$). Glede na testiranje jih uvrstijo v razrede s podobnimi nazivnimi moči, ki običajno odstopajo do 3% (odvisno od proizvajalca) nazivne moči. Nazivni podatki modula nam ob postavitvi modulov v polje ne povedo kaj veliko, saj je moč modulov odvisna od faktorja zračne mase, temperature okolice, temperature modula, sončnega sevanja in vetrovnih pogojev. Bolj primerno je torej prikazati energijski izplen modula v časovnem obdobju. Energijski izplen modula (Y_m) je odvisen od energije (E_m), ki jo modul prejme v časovnem intervalu, in povprečne moči (P_m), ki jo proizvede v tem intervalu. Prejeta energija modula je odvisna od sončne energije, ki jo prejme (H) modul v določenem času, medtem ko je povprečna moč odvisna od gostote sončnega sevanja (G). Obe veličini sta odvisni tudi od površine (A) ter izkoristka pretvorbe energije (η).

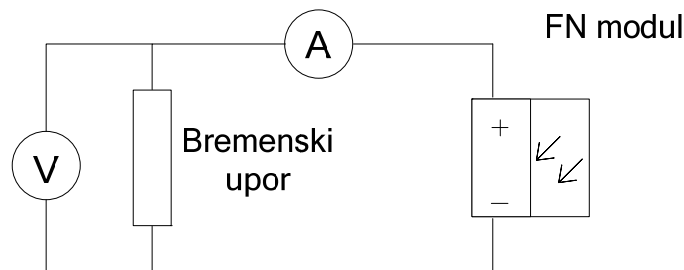
$$Y_m = \frac{E_m}{P_m} = \frac{H \cdot A_{mod} \cdot \eta_{mod}}{G \cdot A_{celic} \cdot \eta_{STC}} \approx \frac{H}{G} \quad (5)$$

Energijski izplen modula je po zgornji enačbi (5) neodvisen od izkoristka in površine modula, vendar to velja le, kadar je površina celotnega modula enaka površini celic in izkoristek enak izkoristku pri STC. Ob neenakosti se enačbe zapletejo in energijski izplen ni enak pričakovanemu s podano močjo ob STC. Ključnega pomena je torej, da energijski izplen temelji na izmerjeni obratovalni moči modula in ne STC moči [10]. Tu se izkaže največja dodana vrednost našega merilnika.

2.5 Princip meritve karakteristike z uporom in kondenzatorjem

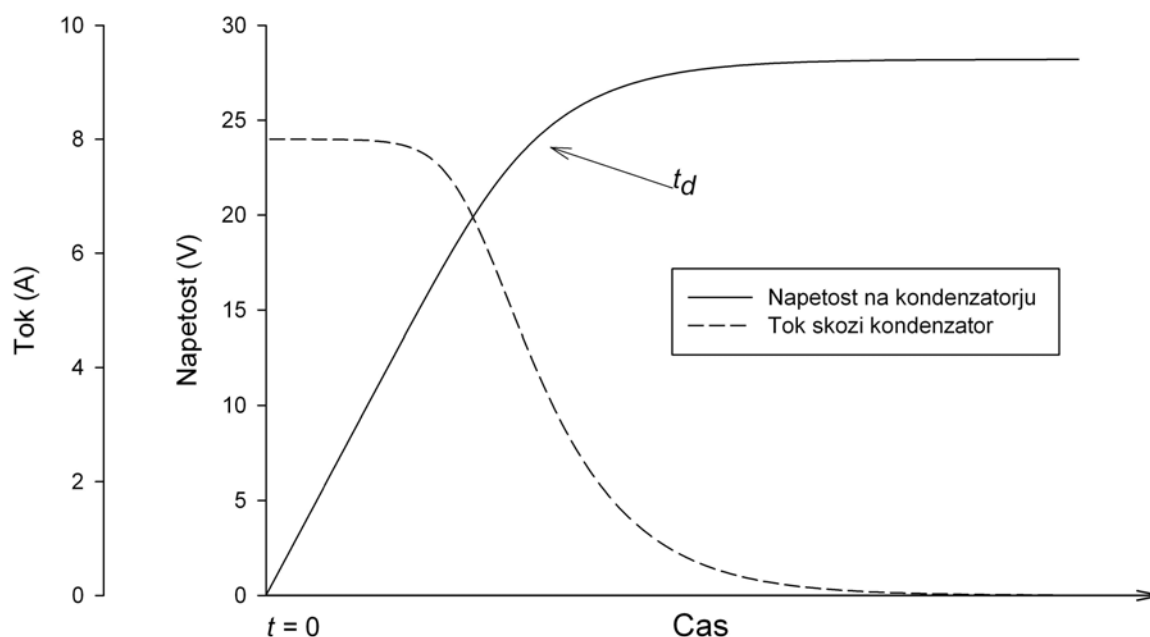
Merjenje električnih veličin na sponkah sončnih celic, FN modulov in polj FN modulov lahko merimo na dva načina: s klasičnim merjenjem U - I karakteristike, kjer spreminjamo bremenski upor sponk, ter alternativni način, kjer sponke bremenimo s kondenzatorjem.

Klasična meritev U - I karakteristike z bremenskim uporom poteka tako, da spreminjamo vrednosti bremenenskega upora ter za vsako vrednost merimo napetost bremena in tok skozenj. Naraščanje upornosti bremena je sorazmerno z napetostjo na njem in obratno sorazmerno s tokom skozenj. Meritev je primerna le za merjenje manjših moči, saj se energija, sproščena na bremenu, v večji meri pretvarja v toplotno energijo, kar pomeni izgube v toku in napetosti. Izgube zmanjšujejo točnost merilnika in se kažejo kot karakteristični odstopki. Če hočemo zagotoviti čim manjše energijske izgube, moramo imeti kratek čas meritve, saj sproščena energija na upor in s tem temperatura, narašča s časom spoščene moči. Omejenost meritve z minimalnim časom merjenja postane neugodna pri večjih močeh, ker je moč zelo velika in se breme prehitro segreje.

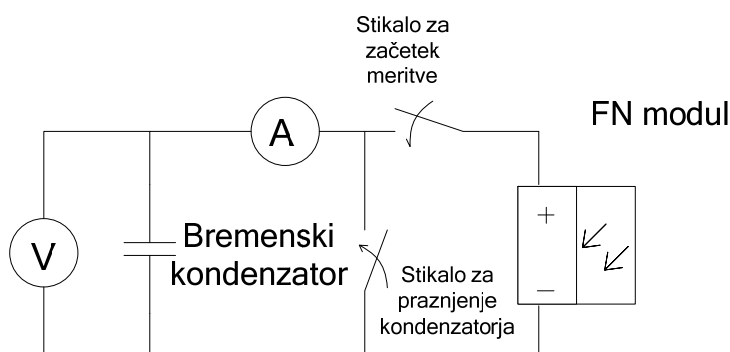


Slika 4: Princip merjenja U - I karakteristike z nastavljivim bremenom.

Pri merjenju karakteristike s polnjenjem kondenzatorja, na mestu uporovnega bremena vežemo kondenzator zaporedno s stikalom za začetek meritve. Ker je modul tokovni generator, prične ob sklenitvi stikala z maksimalnim oz. kratkostičnim tokom modula polniti kondenzator ($t = 0$). Generator polni kondenzator in napetost na njem eksponentialno narašča. Z naraščanjem napetosti kondenzatorja narašča tudi tok skozi diodo, ki povzroči padanje toka skozi kondenzator in ostro zavijanje karakteristike proti toku nič ($t = t_d$). Kondenzator je v napolnjenem stacionarnem stanju, ves tok teče skozi diodo. Takrat je meritev končana ($t = \infty$). Za ponoven začetek meritve kondenzator spraznimo preko stikala za praznjenje kondenzatorja. Večina energije, sproščene pri meritvi, se shrani v kondenzatorju in segrevanje komponent zaradi tega ni problematično, kot pri principu klasične meritve z bremenskim uporom.



Graf 7: Časovni potek principa merjenja U-I karakteristike s kondenzatorjem.

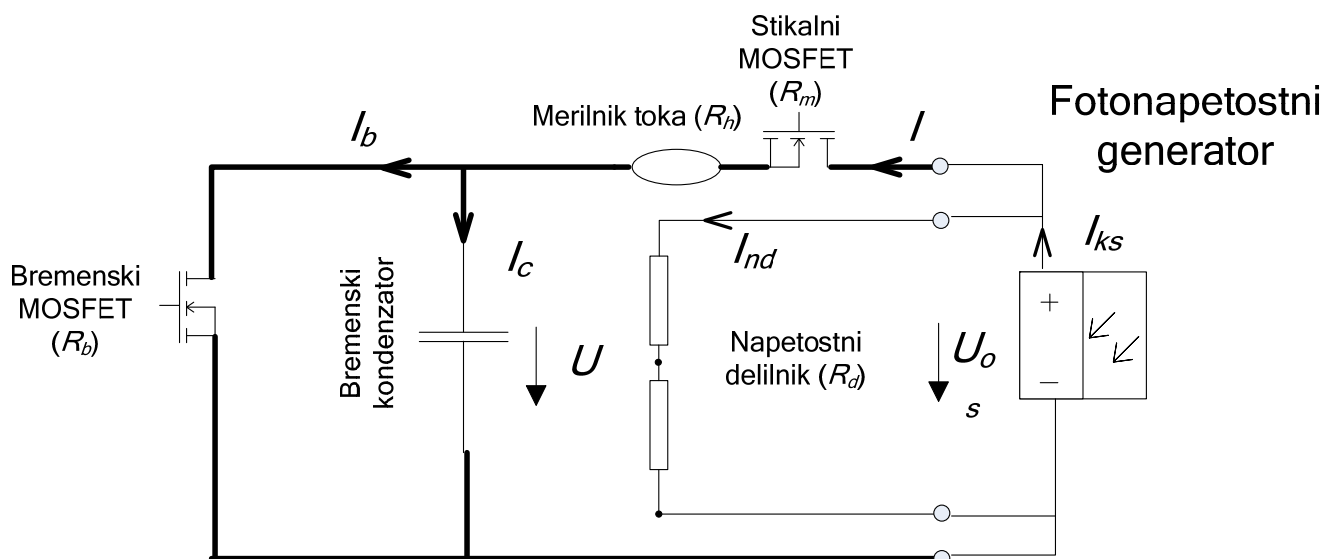


Slika 5: Princip merjenja U-I karakteristike s kondenzatorjem.

2.5.1 Ocena napake

Idealna merilna naprava je hkrati točna in natančna ter daje meritve, ki so vse blizu skupaj in porazdeljene brez raztrosa okoli znane vrednosti. Rezultati izračunov ali meritev so lahko točni, ne pa natančni ali pa natančni in netočni. V primeru puščic izstreljenih v tarčo bodo vse puščice okoli centra a vendar medsebojno oddaljene; takrat smo točni. Natančni, ne pa točni smo v primeru, da vse puščice zadanejo blizu določene točke, a je ta izven tarče.[8].

Merilnik kot del merilnega sistema vsebuje sistematske napake, od katerih je odvisna točnost merilnika in naključne napake, od katerih je odvisna njegova natančnost. Sistematske napake merilnih sistemov nastanejo zaradi nepravilnih principov merjenja, napačne določitve in izbire komponent sistema, med tem ko naključne napake zaradi zunanjih dejavnikov. Napak ne moremo popolnoma odpraviti, ampak jih lahko le zmanjšamo do določene mere. To dosežemo predvsem z načinom merjenja in s pravilno izbiro komponent. Te niso idealne in zaradi tega stikala in merilniki toka nimajo upornosti 0Ω , ter napolnjeni kondenzatorji in merilniki napetosti upornosti neskončno. Glede na velikosti teh vrednosti lahko ocenimo sistematsko napako merilnega sistema.



Slika 6: Shema principa meritev.

Bremenski MOSFET predstavlja breme v primeru merjenja karakteristike s principom nastavljanja bremenske upornosti in stikalo za praznjenje kondenzatorja v primeru principa polnjenja kondenzatorja. Napetostni delilnik predstavlja merilnik napetosti, medtem ko stikalni MOSFET stikalo za začetek meritve.

Pri ocenitvi sistematske napake principa merjenja karakteristike FN modulov privzamemo največjo merjeno napetost modula ($U_{os}=30V$) in toka ($I_{ks}=9A$).

Prvi Kirchhoffov izrek pravi, da je pri vzporedni vezavi upornikov na vseh uporih napetost enaka, tok vira pa se razdeli na posamezne upore [11]. Iz tega sledi, da je tok, s katerim polnimo kondenzator, manjši za tok I_{nd} skozi napetostni delilnik. Tok skozi delilnik z upornostjo $30k\Omega$ je pri napetosti U_{os} enak

$$U_{os} = U = 30V$$

$$I_{nd} = \frac{U}{R_d} = \frac{30V}{30k\Omega} = 10\mu A \quad (6)$$

Relativni odstopok toka zaradi meritve napetosti z napetostnim delilnikom z upornostjo $R_d = 30\text{ k}\Omega$ je

$$\frac{U'}{U} = \frac{R \cdot I_{nd}}{R \cdot I_{ks}} = \frac{I_{nd}}{I_{ks}} = \frac{10\mu A}{9A} = 1,1 \cdot 10^{-6}$$

Padec napetosti U_{mh} zaporedno vezanega stikalnega MOSFETA z upornostjo R_m in merilnika toka z upornostjo R_h , je enak

$$U_{mh} = I_{ks}(R_m + R_h) \quad (7)$$

Povprečne upornosti stikalnega MOSFETA in merilnikov toka se gibljejo od $1\text{ m}\Omega$ do $6\text{ m}\Omega$. Pri izračunu vzamemo srednjo vrednost za oba in takrat je padec napetosti U_{mh}

$$U_{mh} = 9A(4\text{ m}\Omega + 4\text{ m}\Omega) = 72\text{ mV}$$

Relativni odstopok napetosti z zgoraj omenjenima upornostima stikalnega MOSFETA in merilnika toka je

$$\frac{U_{mh}}{U_{os}} = \frac{72\text{ mV}}{30V} = 2,4 \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Pri ocenitvi sistemske napake principa meritve lahko napako v meritvi toka glede na napako meritve napetosti zanemarimo. Točnost principa je torej približno 0,24%.

Točnost analogno digitalne pretvorbe merjenega signala, ki prav tako vpliva na točnost meritve, lahko enostavno ocenimo s podatki o števnem dosegu pretvornika ter največjem signalu, ki ga lahko pretvorimo. Točnost pretvorbe je odvisna njegovega števnege dosega. Hitrost vzorčenja vgrajenega A/D pretvornika je določena s hitrostjo mikroprocesorja in jo lahko glede na hitrost vhodnega signala pri ocenitvi napake izpustimo. Točnost specifičnega števca določimo tako, da največjo razliko vhodnega signala, ki nam jo števec omogoča, delimo s števnim dosegom A/D pretvornika.

Uporabljeni mikroprocesor ima vgrajen 10-bitni A/D pretvornik z največjo možno razliko signala 5V. Točnost pretvornika je torej

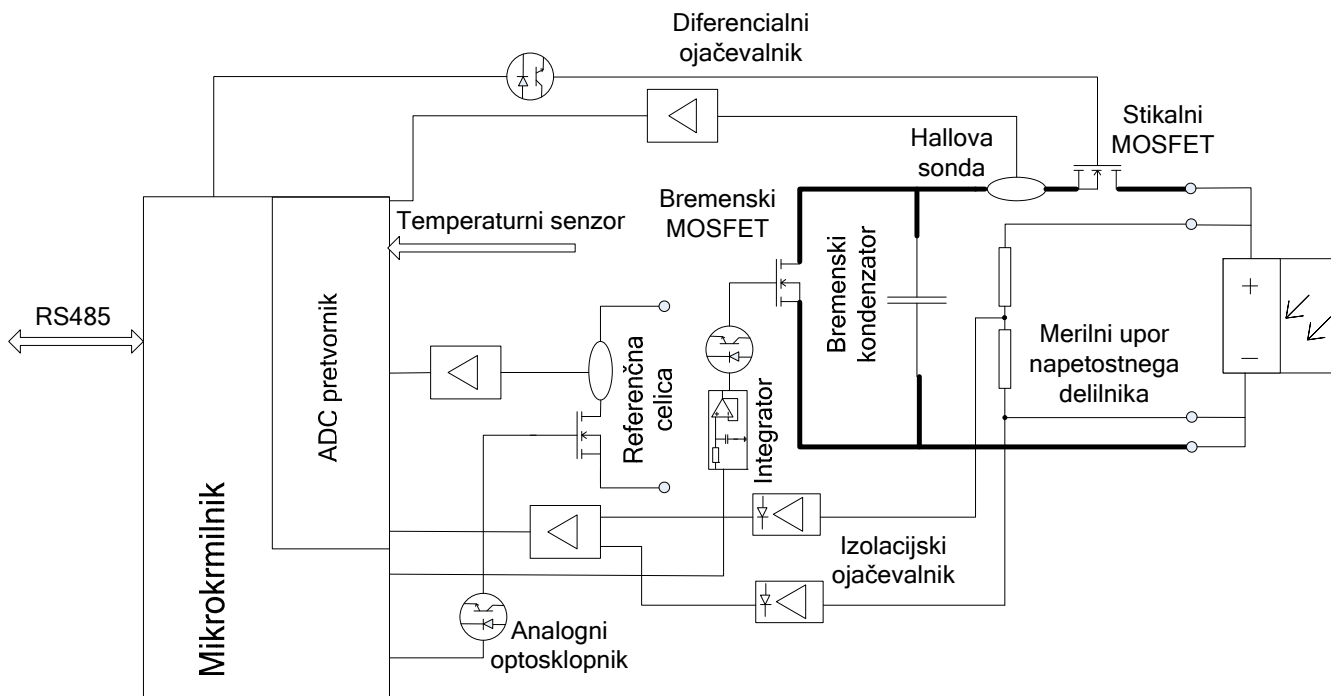
$$n = \frac{5V}{2^{10}} = 4,88 \cdot 10^{-3}V \quad (9)$$

Relativni odstopek sistematske napake je

$$\frac{4,88 \cdot 10^{-3} V}{5} = 9,76 \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

V tem poglavju nismo zajeli sistematske napake izgubnega toka, ki lahko nastane zaradi prevelike upornosti mase, napake zaradi natančnosti merilnika toka, ki je podana s strani proizvajalca in naključne napake, ki lahko nastane zaradi inducirane napetosti pri prenosu merjenega signala. Napaki, ki lahko nastaneta zaradi prevelike upornosti mase in inducirane napetosti pri prenosu signala, sta opisani v poglavju 4. *REZULTATI*.

3. MERILNI PODSKLOPI



Slika 7: Blok shema merilnika

Blokovna shema krmilnika na *Sliki 7* prikazuje osnovne merilne podsklope merilnika. Stikalo za začetek meritve, ki krmili meritev je *Stikalni MOSFET*. FN modul bremenimo z *Bremenskim MOSFETom*, s katerim nastavljammo upornost bremena, če uporabljamo klasično metodo, in v primeru meritve s principom kondenzatorja, praznim kondenzator. Meritev toka poteka z merilnikom toka (*Hallovo sondo*), ki deluje na principu Hallovega pojava in Lorentzove sile. Zaradi premajhnega napetostnega območja A/D pretvornika uporabimo napetostni delilnik za merjenje napetosti, s katerim delimo merjeno napetost, tako da je znotraj merilnega območja 5V. Z referenčno sončno celico določamo gostoto sončnega sevanja, pri kateri je zaradi predhodnega kalibriranja v laboratoriju za določitev gostote sončnega sevanja dovolj merjenje toka. Zgoraj omenjene komponente pripadajo močnostnemu sklopu merilnika in so v celoti optično ločene od ostalih delov merilnika, bodisi z *Analognimi optosklopniki*, *Izolacijskimi ojačevalniki* ali pa je to zagotovljeno s strani proizvajalca komponente.

Optično ločene signale ustrezno ojačamo z *diferencialnimi ojačevalniki* zgrajenimi iz treh operacijskih ojačevalnikov, katerih izhodi so razlike potencialov vhodnih stopenj.

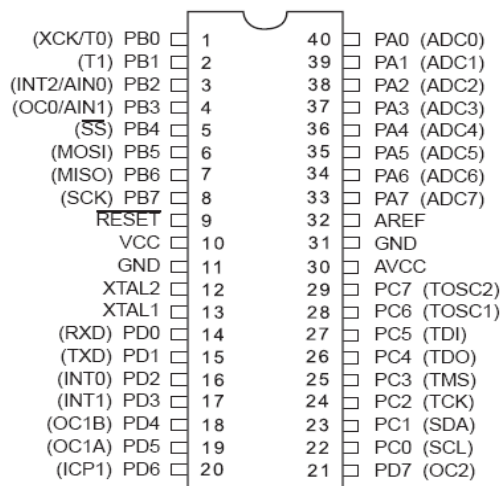
Signale izhodov diferencialnih ojačevalnikov procesiramo z mikroprocesorjem, ki jih pošilja s podatki o izmerjeni temperaturi in gostoti sončnega sevanja osebemu računalniku. Meritev pričnemo tako, da preko RS485 pošljemo paket podatkov iz osebnega računalnika za začetek meritve, procesor jih sprejme, obdela ter ponastavi vse vrednosti spremenljivk v meritvi. Mikroprocesor aktivira stikalni MOSFET in kondenzator se prične polniti, med polnjenjem bere vhode A/D pretvornika ter njihove vrednosti pošilja osebemu računalniku.

Ko se kondenzator napolni, se meritev konča. Merilnik ponovno čaka na sprejem podatkov oz. nadaljuje s principom merjenja karakteristike z nastavljanjem upornosti bremenskega upora, če je to bilo določeno na začetku, zmanjša upornost bremenskega MOSFETA, prebere vhode A/D pretvornika ter pošlje vrednosti o meritvi osebnemu računalniku. V točki najmanjše upornosti mikroprocesor ponovno prične čakati na prejem paketa podatkov.

3.1 Procesorski sklop

Mikroprocesor, pretvornik signalov za RS485 komunikacijo, napetostni stabilizatorji za merilnik, predstavljajo procesorski del, ki krmili meritev, zajema podatke o stanju meritve ter omogoča komunikacijo med merilnikom ter osebnim računalnikom.

Mikroprocesor našega merilnika je produkt proizvajalca Atmel in spada v družino ATMEGA16. Je visoko zmogljiv 8-bitni AVR mikroprocesor z nizko porabo. Ima 16 kB vgrajenega pomnilnika ter 512 bajtov programiljivega EEPROMa, deset-bitni A/D pretvornik, 4 PWM izhode, USART, SPI vmesnike, notranji oscilator in še dodatne funkcije, ki jih nismo izpostavili [15].



Slika 8: ATmega16 [15].

Funkcije posameznih vhodno-izhodnih pinov so:

VCC: Napajalna napetost (Procesor deluje pri napetosti 4,5 - 5,5V);

GND: Masa;

Porti A (PA0 – PA7) služijo kot analogni vhodi. Služijo tudi kot 8-bitni dvosmerni digitalni porti, če A/D pretvornik ni vključen;

Porti B (PB0 – PB7), Porti C (PC0-PC7) in Porti D (PD0-PD7) so 8-bitni dvosmerni digitalni porti;

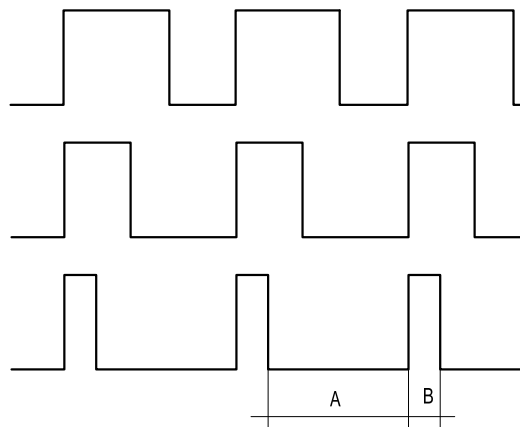
XTAL1: Vhod za clock-pulz in vhod za oscilatorski ojačevalec;

XTAL2: Izhod za oscilatorski ojačevalec;

AVCC : Vhod, za napajanje porta A in A/D pretvornika;

AREF: Vklon, izklon A/D pretvornika. Kadar je v logični enki (5V) je A/D pretvornik vklopljen.

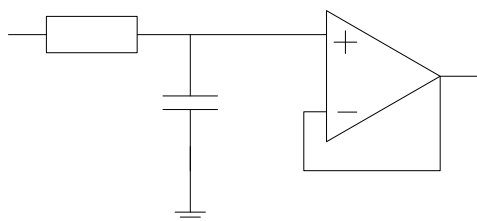
Mikroprocesor ne vsebuje integriranih D/A pretvornikov, ki jih potrebujemo za zvezno spreminjanje upornosti bremenskega MOSFETA in zaradi tega uporabimo izhod, ki daje impulze z možnostjo spreminjanja njihove širine. Takšni izhodi se imenujejo PWM (Pulse Width Modulation). Pulzno širinska modulacija je močna tehnika za krmiljenje analognih vezij z digitalnimi signali [9]. Deluje na podobnem principu kot navadno stacionarno stikalo, ki ga vklopimo in izklopimo, le da je ta izvedena z modernimi elektronskimi stikali. Frekvenca je konstantna, spreminja se širina pulza, kar omogoča enostavno relativno določitev moči z razmerjem med površino delovnega in ničelnega pulza, na *sliki 9* med *B* in *A* [14].



Slika 9: Pulzno širinska modulacija.

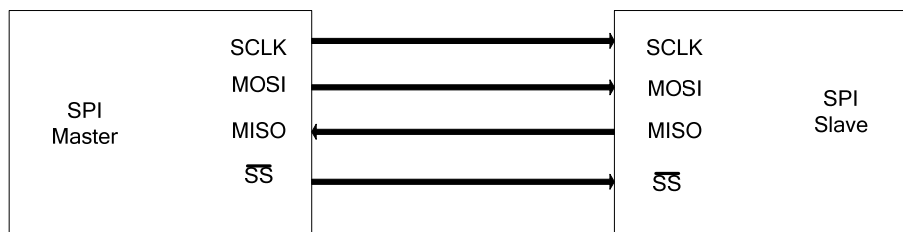
Mikroprocesorjev PWM ima najhitrejšo možno frekvenco generiranja signalov okoli 20 kHz. Dobljeni signal lahko povprečimo z integratorjem in dobimo zvezen napetostni signal, s katerim v našem primeru krmilimo bremenski MOSFET.

Integrator ali povprečevalnik opravlja matematično operacijo integriranja, kjer iščemo ploščino pod krivuljo grafa opazovane funkcije. Ko ima krivulja pozitivne vrednosti, ploščina s časom narašča, pri negativnih vrednostih, pa pada. Kjer ima krivulja vrednost nič, ostane ploščina nespremenjena. Po določenem časovnem intervalu je integral te funkcije proporcionalen ploščini v tem intervalu.



Slika 10: Integrator.

SPI (Serial Peripheral Interface) vmesnik je vmesnik za komunikacijski protokol sinhrona serijske podatkovne povezave za dvostransko pošiljanje podatkov. Naprava omogoča komuniciranje po principu gospodarja in služabnika, kjer gospodar sproži podatkovni prenos. Več naprav služabnikov omogočimo s posameznimi izbirami služabniških linij [16]. V našem merilniku je uporabljen za ISP(In System Programming) programiranje.



Slika 11: SPI povezava z gospodarjem in služabnikom.

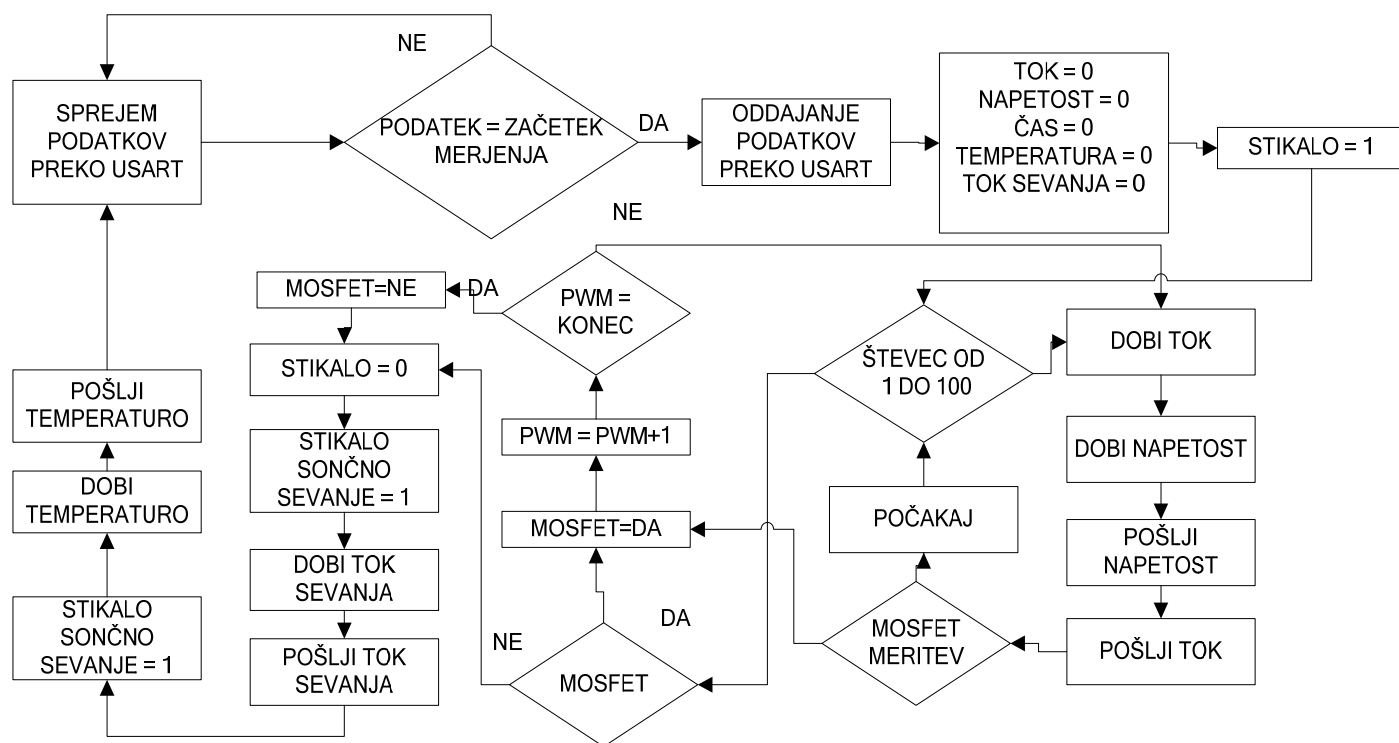
USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) vmesnik za komunikacijo, je pretvornik paralelnih in serijskih podatkovnih oblik, ki lahko deluje asinhrono ali sinhrono. Z dodatnimi pretvorniki želenih podatkovnih oblik komuniciramo z osebnim računalnikom, ki je lahko oddaljen več deset metrov. Operacijo dodatnega pretvornika opravlja MAX485, z majhno napajalno napetostjo 5V, ki ne potrebuje dodatnih komponent.

Precizni zunanji kristalni oscilator daje takt mikroprocesorju (kako hitro deluje). Posredno določa tudi največjo možno hitrost oz. frekvenco vzorčenja podatkov na vseh mikroprocesorja. Kristalni oscilator temelji na mehanski resonančni vibraciji kristala iz piezoelektričnega materiala in proizvaja zelo natančno frekvenco.

Večina komponent za točno ter normalno delovanje potrebuje konstantno napajalno napetost, ki se časovno ne spreminja. Stabilizator je elektronski element, ki vzdržuje stalno vrednost kake električne veličine. Lahko so izvedeni kot stabilizatorji konstantnih izhodnih napetosti ali pa kot stabilizatorji z možnostjo nastavitve izhodne napetosti. Izvedeni so lahko kot stabilizatorji pozitivnih ali pa negativnih izhodnih napetosti. Stabilizator napetosti je nujno potreben, saj nihanja napetosti lahko povzročijo okvaro elektronskih elementov, kot je mikroprocesor, povzročajo motnje pri meritvi, ipd. Nestabilizirano napajanje krmilnika povzroča tudi naključno napako, saj se v napajalnih vodnikih inducirajo razne napetosti.

3.1.1 Diagram poteka izvajanja programa

Program za mikroprocesor oz. njegova logična stanja opišemo z blokovnim diagramom v obliki algoritma. Meritev zahteva krmiljenje celotne meritve in kontinuirano spremljanje vhodnih veličin ter posredovanje teh osebnemu računalniku.

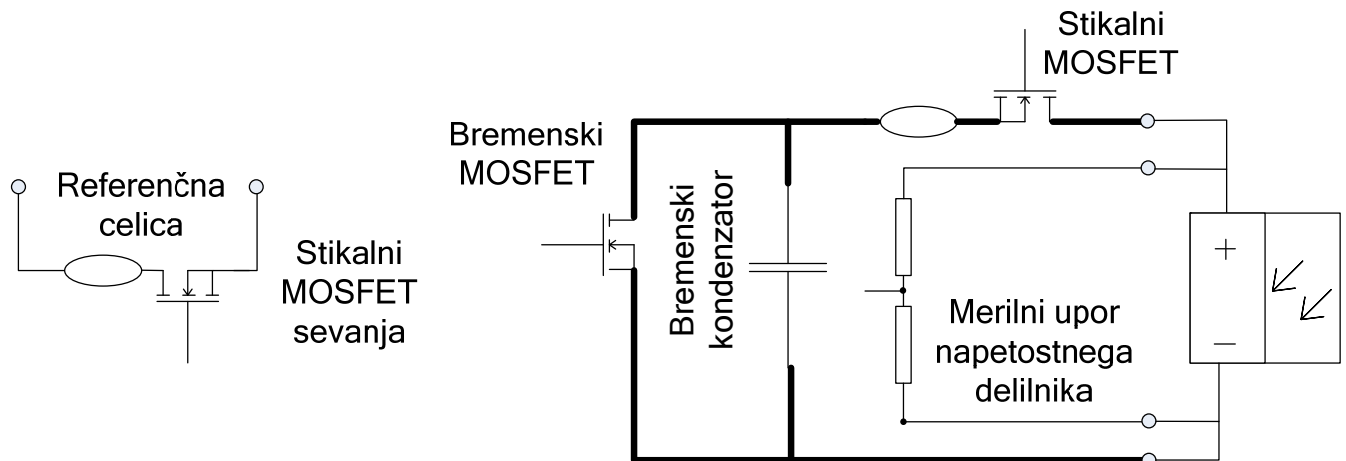


Slika 12: Diagram poteka izvajanja programa.

Kadar je program v stanju pripravljenosti, v nedogled preverja, ali je bil iz osebnega računalnika poslan paket podatkov za začetek meritve. V kolikor ga prejme, nastavi komunikacijo za oddajanje in ne sprejema več podatkov. Vse merjene spremenljivke postavi na 0 in prične meritev s principom polnjenja kondenzatorja, tako da postavi izhod, ki je vezan na stikalni MOSFET, v logično enko. Program preide v zanko, v kateri ostane 100 korakov. V teh korakih prebere analogne vhode z informacijo o toku in napetosti ter ju pošlje računalniku, preveri, ali opravlja princip z nastavljenim bremenom. V primeru, da ga ne opravlja, počaka določen čas, ki je enak 1/100 časa polnjenja kondenzatorja. Po stotih korakih program preveri, ali je bila zahtevana meritev karakteristike s principom nastavljanja bremenske upornosti. Če je bila, postavi spremenljivko za ta princip merjenja v logično enko, poveča analogno vrednost bremenskega upora in preveri, ali je vrednost dosegla maksimum. Če vrednost še ni dosegla maksimuma, prične z branjem analognih vhodov ter pošiljanjem napetosti in toka osebnemu računalniku. Sedaj je izbrana meritev z nastavljanjem upornosti bremenskega upora in program nadaljuje s povečevanjem analogne vrednosti bremenskega upora. Ko doseže maksimalno vrednost, program izključi meritev nastavljanja upornosti bremena. Izključi stikalo za potek meritve in prebere vhod o informaciji sončnega sevanja, pošlje njegovo vrednost osebnemu računalniku, prebere vhod o informaciji temperature, pošlje njeno vrednost in preide v stanje pripravljenosti.

3.2 Močnostni sklop

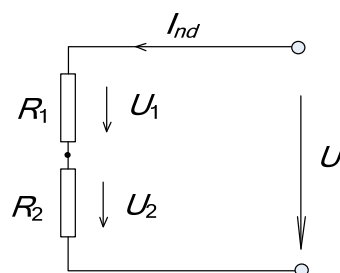
Močnostni sklop vsebuje vse elemente, ki so neposredno v stiku z merjenim FN modulom in optično ločeni od ostalega dela, ter referenčno sončno celico s stikalom za začetek meritve določanja gostote sončnega sevanja.



Slika 13: Shema močnostni sklop.

3.2.1 Napetostni delilnik

Namen delilnika napetosti je, da razdeli napetost FN modula, saj je ta izven merilnega območja A/D pretvornika. Delilnik napetosti je vezje, ki ga sestavljata dva ali več zaporedno vezanih uporov. V našem primeru je ta zgrajen iz dveh. Njegova prenosna funkcija je



Slika 14: Delilnik napetosti.

Napetost FN modula je enaka seštevku napetosti na uporih

$$U = U_1 + U_2 \quad (11)$$

Tok I_{nd} je skozi zaporedno vezane upore enak

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (12)$$

Vstavimo U_1 v enačbo (11), jo preoblikujemo in dobimo razmerje uporov delilnika, za želeno napetost U_2 glede na napetost U

$$U_2 \cdot R_1 = (U - U_2) \cdot R_2$$

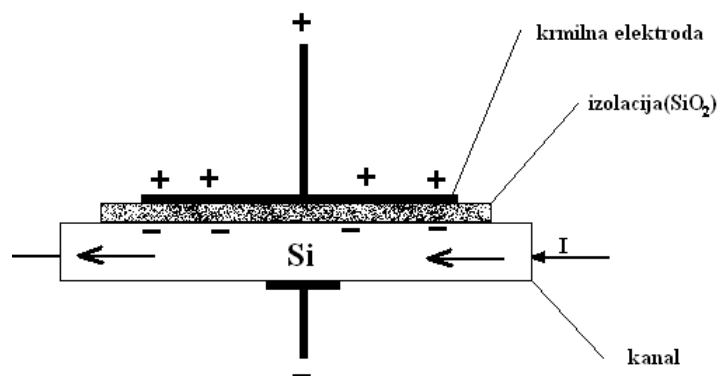
Merilno območje našega A/D pretvornika je 5V, kar pomeni, da je $U_2 = 5V$.

3.2.2 Referenčna sončna celica

Referenčna sončna celica je navadna sončna celica, katera je predhodno kalibrirana in ima določen koeficient, ki določa odvisnost med gostoto sončnega sevanja in kratkostičnim tokom celice. Uporablja se za določitev gostote sončnega sevanja. Referenčna celica mora biti v neposredni bližini merjenega modula in imeti isto prostorsko usmerjenost.

3.2.3 Krmiljenje meritve

MOSFET tranzistor je elektronski polprevodniški element, kateri sodi med unipolarne tranzistorje. FET pomeni Field Effect Transistor, kar nam pove, da prevodnost kanala spreminjamo s pomočjo električnega polja. MOS pomeni v angleščini Metal-Oxide-Semiconductor, kar v slovenščini pomeni kovinsko oksidni polprevodnik. Vhodna elektroda ni spojena neposredno s kanalom, ampak ju ločuje tanka oksidna plast polprevodnika, ki ne prevaja električnega toka. Elektrone, ki pritečejo v vrata, tam tudi ostanejo, zato se struktura med vhodnim priključkom in kanalom obnaša kot kondenzator. Ko na elektrodo priključimo pozitivno napetost, se na krmilni elektrodi nabere pozitivni naboj, negativni pa na kanalu tik pod izolatorjem. Ker je kanal prevodnik, se zaradi kopičenja električnega naboja prevodnost na tem mestu poveča. Količina naboja v kanalu je odvisna od zunanje napetosti, tako lahko krmilimo prevodnost kanala.

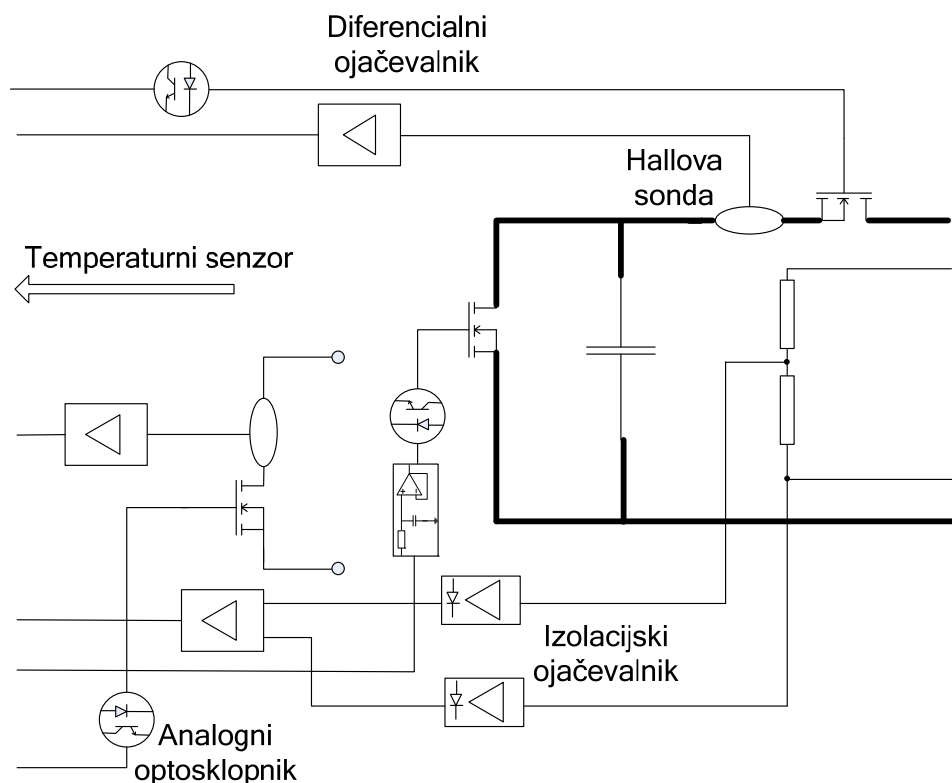


Slika 15: Princip delovanja MOSFET tranzistorja.

Glede na delovanje ločimo dva tipa tranzistorjev: z vgrajenim kanalom in z induciranim kanalom. Razlika med njima je, da je pri napetosti krmilne elektrode MOSFET tranzistorju z vgrajenim kanalom, prevodnost kanala določena s količino primesi vgrajene v kanalu. Prednost tega je, da lahko tranzistor krmilimo s kakršnikoli napetostnim potencialom, med tem ko mora biti napetostni potencial pri MOSFET tranzistorju z induciranim kanalom dovolj pozitiven, da postane kanal prevoden. MOSFET-i imajo za razliko od spojnih FET tranzistorjev vhodni priključek galvansko ločen, med tem ko je pri spojnih FET-ih galvansko povezan. To ima veliko prednost, saj je vhodna upornost še višja [13]. MOSFET krmilimo preko napetosti na upor, ki je zaporedno vezan na kolektor analognega optosklopnika.

3.3 Merilni sklop

Merilni sklop sestavljajo diferencialni ojačevalniki z visoko impedančnimi vhodi, temperaturni senzor, merilnika toka, optosklopniki ter izolacijski ojačevalniki.

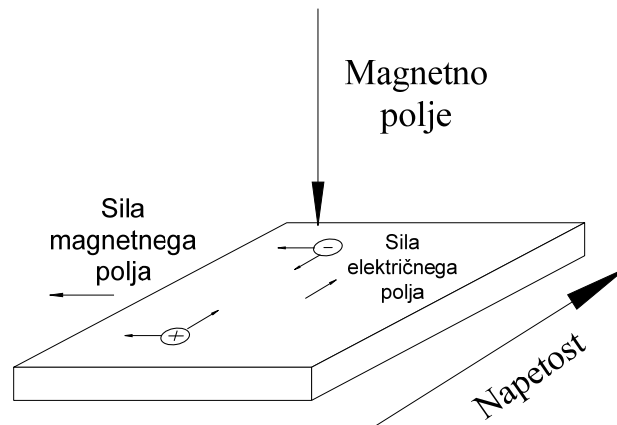


Slika 16: Merilni sklop merilnika

3.3.1 Merilnik toka

Tokovni merilniki, ki temeljijo na principu Hallovega pojava, so zelo pogosti, imajo visoko natančnost in so relativno poceni. Za razumevanje njihovega delovanja moramo najprej razumeti Hallov pojav.

Hallov pojav temelji na Lorentz-ovi sili, ki deluje na gibajoče nosilce električnega naboja v vseh snoveh, ko so le-te izpostavljene zunanemu magnetnemu polju. Za zgled vzemimo trak iz polprevodniške snovi, na konce katerega je priključen generator enosmerne napetosti. Sila električnega polja prisili proste nosilce naboja h gibanju v nakazani smeri.



Slika 17: Vpliv magnetnega polja na vodnik pod napetostjo.

V prisotnosti tujega magnetnega polja, ki je pravokotno na površino senzorja, se pot elektronov in vrzeli ukrivi k stranskima stranicama. Na stranicah se kopiči električni naboj, a le toliko, dokler sila električnega polja zaradi nakopičenega naboja ni enaka Lorentzovi sili, ki deluje na gibajoči naboj

$$\vec{F} = -q\vec{E}_h \quad (13)$$

Napetost zaradi nakopičenega naboja se imenuje Hallova napetost

$$U_h = E_h \cdot d = v \cdot B \cdot d \quad (14)$$

kjer je d širina traku. Napetost je tem večja, ter s tem tudi tehnično uporabna, čim večje je razmerje med dolžino in širino polprevodniškega traku l/d . Celotno število prostih nosilcev naboja, ki v časovni enoti preide ploskev S , je enako gostoti toka J

$$J = v \cdot N \cdot q \quad (15)$$

S preoblikovanjem enačbe za frekvenco v dobimo

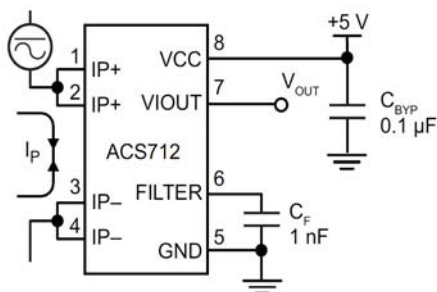
$$U_h = \frac{J}{q \cdot N} \cdot B \cdot d \longrightarrow B = k \cdot U_h$$

kjer je

$$k = \frac{N \cdot q}{J \cdot d}$$

Vidimo, da je gostota magnetnega polja prenosorazmerna snovni konstanti senzorja in izmerjeni Hallovi napetosti. Odločujoč parameter snovne konstante predstavlja mobilnost elektronov, ki je od kovine do kovine različna. Najvišja je ravno pri polprevodniških materialih (InSb, InAs, GaAs). Mobilnost prostih nosilcev je temperaturno zelo odvisna, kar velja tudi za Hallovo napetost U_H in R_{in} - notranjo upornost senzorja [11]. Osnovni princip delovanja je pri vseh enak. Razlikujejo se v izvedbah, ki temeljijo na območju merjenja ter natančnosti. Zaradi tega se nekatere sonde močno razlikujejo.

Uporabljeni tokovni merilnik proizvajalca Allegro je ekonomična in natančna rešitev za AC in DC merjenje toka v industrijskih, komercialnih in komunikacijskih sistemih. Tipične aplikacije vključujejo krmiljenje motorjev, detekcijo bremen, meritev toka ipd. Tok skozi bakreno plast senzorja povzroča nastanek magnetnega polja, katerega integrirano vezje pretvori v proporcionalno napetost. Natančnost je optimizirana s hitrimi magnetnimi signali v Hallovem pretvorniku. Precizna, proporcionalna napetost je proizvedena s pomočjo nizko kompenzacijskega, bakrenega stabiliziranega BiCMOS integriranega vezja. Izhodna napetost je pozitivna, kadar skozi primarno bakreno plast teče tok. Notranja upornost plasti je okoli $1,2\text{m}\Omega$ in povzroča zelo majhne izgube. Tanko nanosena plast bakra omogoča petkratno prekoračitev toka in je električno izolirana od signalnih. Zaradi tega jo lahko uporabljamo brez dodatnih izolacijskih elementov. V proizvajalčevih navodilih najdemo vse ustrezne podatke za vezavo Hallove sonde v elektronski sistem. Podane so vse karakteristike, ki jih potrebujemo za njeno uporabo, ter nekaj aplikacij, ki nam olajšajo snovanje novih izdelkov. Merilniki toka, ki delujejo na principu Hallovega pojava so integrirana vezja. Takšni merilniki nam precej olajšajo snovanje merilnikov toka, saj ni potrebno znanje o njihovem delovanju, ker je v navodilih opisana samo priključitev oz. pomen izhodno vhodnih enot integriranega vezja [12].

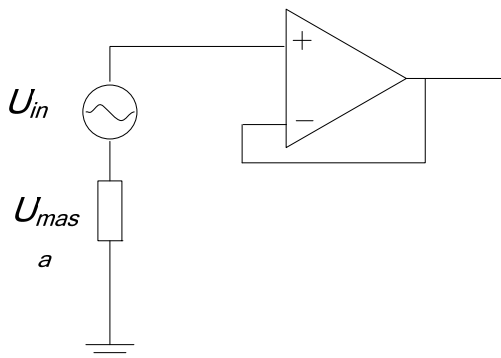


Slika 18: Tokovni merilnik Allegro ACS712.

Vezava merilnika, prikazana na sliki 18, daje izhodni analogni signal V_{OUT} od 0,5 do 4,5V in je primerena za meritve tako enosmernih kot izmeničnih tokov. Nazivni tok I_p je odvisen od modela merilnika. Kondenzator C_F je priporočen za uporabo, saj zmanjšuje motnje in šum pri meritvi.

3.3.2 Optična ločitev

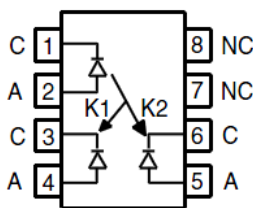
Zaradi prevelike upornosti mase se lahko pri meritvi zaradi velikega toka FN modula, pojavi padec napetosti na njej, kar povzroči sistemsko napako pri meritvi. Z optično ločitvijo zagotovimo galvansko ločitev močnostnega dela od ostalega in tako preprečimo padec napetosti na masi.



Slika 19: Padec napetosti zaradi prevelike upornosti mase.

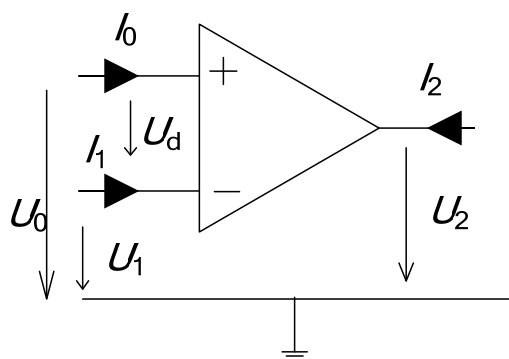
Izolacijski ojačevalnik je elektronski element, ki galvansko ločuje vhodno in izstopno stopnjo. V našem primeru je to storjeno z LM385 operacijskim ojačevalnikom ter linearnim optosklopnikom IL300.

Optosklopnik je sestavljen iz svetleče diode ter svetlobno občutljivega polprevodniškega elementa, ki je lahko fotodioda, fototranzistor ali fototiristor. Oba elementa sta vgrajena v ohišje tako, da svetlobo iz svetleče diode sprejme fotoelement. Električni signal, ki prihaja v optosklopnik, se v njem pretvori v svetlobni signal ter na izhodu ponovno v električni signal. Z njim dosežemo, da sta vhodna in izhodna priključka galvansko ločena. Linearni optosklopnik je namenjen linearizaciji prenosnega signala, saj ima dodatno sprejemno fotodiodo za povratno vezavo optične ločitve. Obe diodi prejmeta približno enako svetlobe, ki je odvisna od prenosnega koeficienta, podanega s strani proizvajalca.



Slika 21: Linearni optosklopnik IL300.

Operacijski ojačevalnik (OPA) je elektronski element, ki nam v elektronskih vezjih omogoča analogne operacije. Povratna vezava določa, katero linearno operacijo bo sistem z operacijskim ojačevalnikom izvrševal in kakšno bo njegovo ojačenje. Fazne spremembe med vhodno in izhodno napetostjo ali tokom so bistvene za delovanje sistema. OPA ima dva vhoda, sofazni vhod + in protifazni vhod - in običajno le en izhod – simbol operacijskega ojačevalnika je prikazan na *sliki 22* [18].



Slika 22: Operacijski ojačevalnik [18].

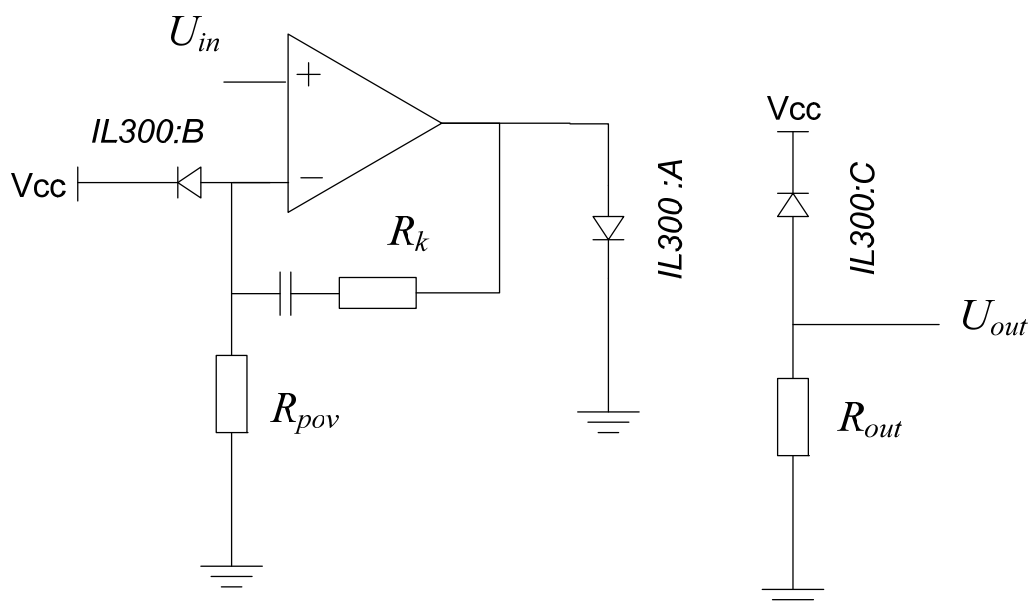
Ojačenje pri operacijskem ojačevalniku, ki ima dva vhoda, ni več enoumno določeno, definiramo ga lahko kot ojačenje spremembe električne veličine prek enega, drugega ali obeh vhodov, na več načinov:

- diferenčno ojačenje je razlika vhodnih signalov

$$A_d = \frac{U_2}{U_0 - U_1} \quad (16)$$

Tako dobimo še dva osnovna načina ojačenja. Invertirajoče kadar je $U_0=0$, sta vhodna napetost U_1 in izhodna U_2 v protifazi. Neinvertirajoče kadar je $U_1=0$, sta vhodna napetost U_0 in izhodna U_2 v fazi.

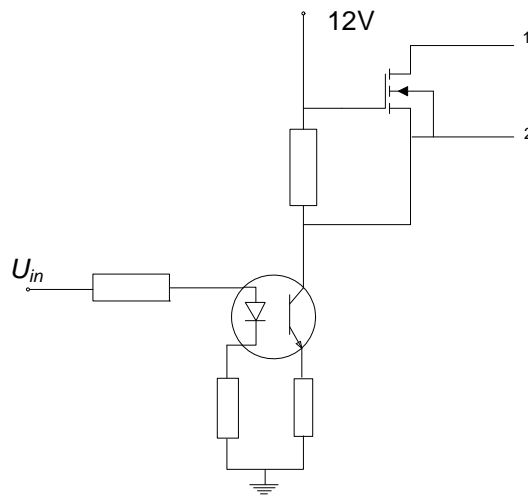
Običajno imajo operacijski ojačevalniki ojačenja med 10^3 in 10^6 . Vendar pri teoretičnih analizah uporabljamo idealni OPA, katerega odprtozančno ojačenje je neskončno, tokova I_0 in I_1 pa sta enaka 0. Idealni ojačevalnik takoj preide v nasičenje in je neuporaben brez povratne vezave, katera določi velikost ojačenja ter njegovo funkcijo. Dejanski operacijski ojačevalnik zelo odstopa od idealnega. Vhodne in izhodne vrednosti imajo končne vrednosti, izhodna napetost ima zgornjo in spodnjo mejo ojačenja, nad katero odpovejo vse funkcije OPA [18].



Slika 23: Shema izolacijskega ojačevalnika.

Operacijski ojačevalnik primerja vhodno napetost U_{in} ter napetost na upor R_{pov} . Na začetku ni napetosti na upor, saj je upornost $IL300:B$ teoretično neskončna, zaradi tega preide izhod operacijskega ojačevalnika v nasičenje. $IL300:A$ je sedaj pod napetostjo, ter oddaja svetlobo fotodiodama $IL300:B$ in $IL300:C$. Napetost na upor R_{pov} se sedaj zviša in uravna izhod. S povratno vezavo ene od fotodiod dosežemo linearnost optosklopnika ter s tem dobimo izolacijski ojačevalnik. Ker ojačevalnik ne ojačuje samo razlike potencialov vhodne napetosti, ampak tudi signale, se pri ojačanjih zaradi notranjega RC vezja pojavijo fazni premiki, ki lahko povzročijo, če so dovolj veliki, da ojačevalnik zaniha. Dodati moramo še kompenzacijsko frekvenčno odvisno povratno vezavo, v našem primeru upora R_k in kondenzatorja.

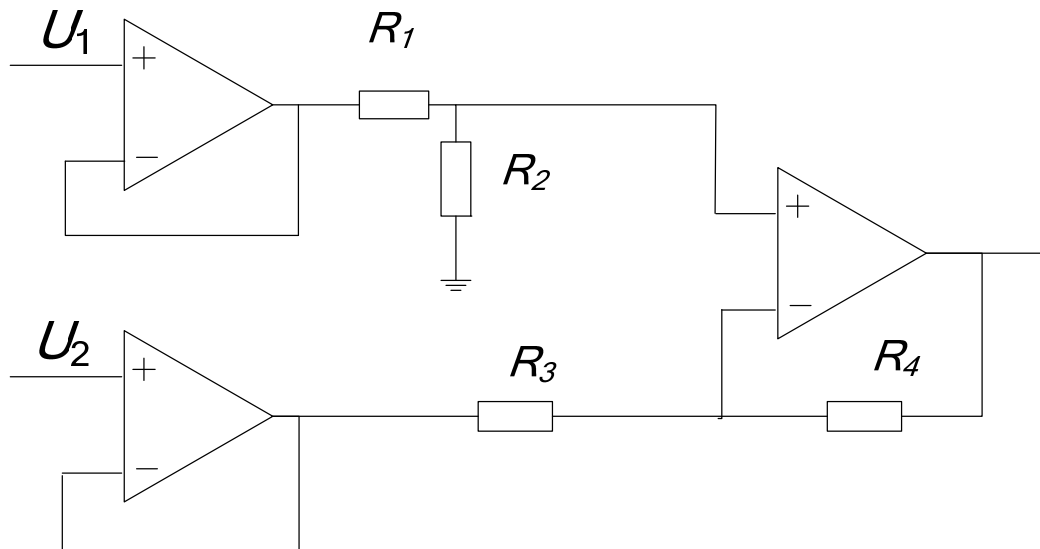
Optična ločitev MOSFETov je storjena z navadnimi analognimi optosklopniki brez povratne vezave, saj ne potrebujemo linearnega prenosa signala. Namesto sprejemnih fotodiod imajo fototiristor.



Slika 20: Optična ločitev MOSFET-a z analognim optosklopnikom.

3.3.3 Diferencialni ojačevalnik

Diferencialni ojačevalnik je vhodna stopnja v A/D pretvornik mikroprocesorja. Njegova naloga je, da primerja potenciala, ju ustrezno ojači ter posreduje razliko oz. diferenco A/D pretvorniku. Diferenčno ojačanje je potrebno, saj modul ni povezan z maso merilnika in zaradi tega nimata enake referenčne točke. Izmeriti moramo torej razliko potencialov upora delilnika napetosti. Napetostna sledilnika, zagotavljata visoko vhodno impedanco diferencialnega ojačevalnika.



Slika 24: Diferencialni ojačevalnik

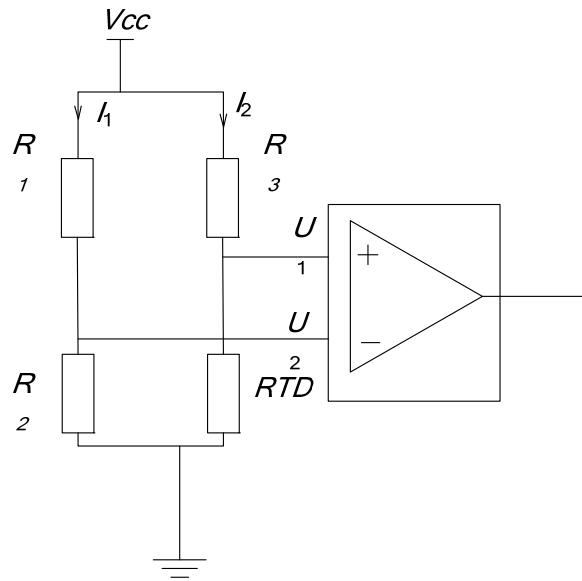
Izhodna napetost U_{out} v odvisnosti od vhodnih potencialov je enaka

$$U_{out} = \frac{(R_4 + R_3)R_2}{(R_1 + R_2)R_3} \cdot U_1 - \frac{R_4}{R_3} \cdot U_2 \quad (17)$$

3.3.4 Senzor temperature

Merjenje temperature poteka z uporovnim detektorjem temperature, ki je v bistvu temperaturno občutljiv upor. Ima pozitiven temperaturni koeficient, kar pomeni, da se upornost s temperaturo viša. Kolikšen je koeficient je odvisno od materiala iz katerega je narejen. Zaradi lastne notranje upornosti tankih vodnikov temperaturni senzor samega sebe segreva in je zaradi tega potrebno zagotoviti skozenj tok manjši od 3 mA [19].

Merjenje upornosti na upor je izvedeno z mostično metodo:



Slika 25: Shema mostične vezave senzorja temperature z diferencialnim ojačevalnikom.

Diferenca $\Delta U = U_1 - U_2$, je odvisna od enakosti R_1 in R_2 ter R_3 in RTD .

Potenciala U_1 in U_2 sta

$$U_1 = I_1 \cdot R_2 = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (18)$$

$$U_2 = I_2 \cdot RTD = \frac{V_{cc}}{R_3 + RTD} \cdot RTD$$

Diferenca je torej

$$\Delta U = V_{cc} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{RTD}{RTD + R_3} \right) \quad (19)$$

Diferenco ustrezno ojačimo z diferencialnim ojačevalnikom, ki ga določimo s kalibriranjem temperaturnega senzorja.

Pri faznem prehodu ledu iz trdnega agregatnega stanja v kapljevino ima led zagotovo 0°C . Taljenje je pri sobni temperaturi relativno počasno in lahko enostavno s termometrom merimo naraščanje temperature mešanice ledu in vode. Kalibriranje temperaturnega senzorja poteka tako, da ga postavimo v mešanico vode in ledu pri sobni temperaturi. Temperaturo vode merimo z že kalibriranim senzorjem temperature oz. termometrom, medtem ko upornosti v odvisnosti od temperature zapisujemo. Po končanju merjenja, ko voda doseže sobno temperaturo, lahko iz dobljenega grafa temperature in upornosti izračunamo temperaturni koeficient upornosti RTD.

4. REZULTATI in IZSLEDKI

Hipoteze za vezja, opisana v prejšnjih poglavjih, smo potrjevali s simulacijami, s katerimi smo simulirali pogoje meritve. Potrjevali smo jih po posameznih sklopih s programskim orodjem za simulacijo elektronskih vezij OrCad PSpice.

Osnovni paket tega orodja nam omogoča :

- istočasni pregled rezultatov simulacije v več oknih hkrati,
- primerjavo več različnih simulacij različnih vezij v enem samem oknu,
- enostavni prikaz napetosti, tokov in šuma,
- uporabo večvrstičnih aritmetičnih izrazov za analizo rezultatov simulacije,
- prikaz Fourierjeve transformacije signalov napetosti in toka
- obdelavo vrednosti napetosti in tokov z aritmetičnimi izrazi,
- prikaz analognih in digitalnih signalov na skupni časovni bazi
- dodajane besedila, label in ostalih simbolov za razjasnitev prikazanih rezultatov [20].

V naslednjih poglavjih so predstavljeni ter opisani rezultati simulacij za posamezne sklope merilnika, s katerimi smo preverjali hipoteze.

4.1 Princip meritve karakteristike s principom polnjenja kondenzatorja

Princip meritve karakteristike s principom polnjenja kondenzatorja je pravilen in omogoča meritve karakteristike sončne celice, FN modula in polja FN modulov. S to hipotezo bomo preverjali delovanje merilnika. Princip smo opisali z modelom sončne celice, ki smo mu dodali model polnjenja kondenzatorja, v odvisnosti toka od napetosti. V kolikor je graf $I(U)$ funkcije za polnjenje kondenzatorja s FN generatorjem identičen oz. zelo podoben grafu simulacije, lahko potrdimo hipotezo.

Modelu sončne celice med sponke dodamo kondenzator. Tok skozi kondenzator (I_c) je po zgledu enačbe (1)

$$I_c = I_i - I_d - I_p$$

Najprej ves tok teče skozi sponke. Napetost na kondenzatorju (U) je enaka napetosti paralelnega upora in diode (U_{pd}), zmanjšane za padec napetosti skozi serijski upor. To zvezo predstavlja enačba (3). V enačbo (3) vstavimo zvezo za padec napetosti na paralelnem uporu in diodi in dobimo

$$U = I_p \cdot R_p - I_c \cdot R_s \quad (20)$$

Tok skozi paralelni upor je enak toku izvora (I_i), zmanjšanemu za tok skozi kondenzator, saj tok skozi diodo ne teče.

$$I_c = I_i - I_p \quad (21)$$

Izpostavimo I_p , ga vstavimo v enačbo (20) ter izpostavimo I_c

$$I_c = \frac{I_i \cdot R_p - U}{R_p + R_s}$$

Padec napetosti je na kondenzatorju, paralelnem uporu in diodi enak, iz tega sledi, da je tok skozi diodo v odvisnosti od napetosti

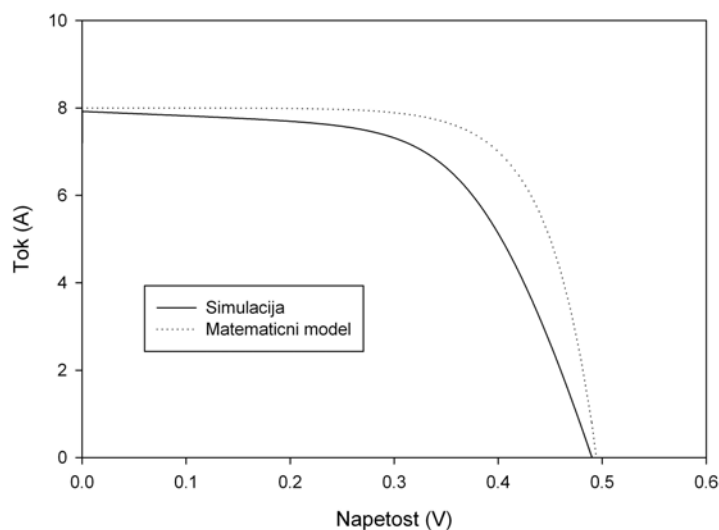
$$I_d = I_z \left(e^{\frac{q_0 \cdot U}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (22)$$

Ko prične teči tok skozi diodo, moramo odšteti še tok skozi diodo po zgledu enačbe (1). Tok skozi kondenzator je takrat

$$I_c = \frac{I_i \cdot R_p - U}{R_p + R_s} - I_z \left(e^{\frac{q_0 \cdot U}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (23)$$

Izpeljali smo matematični model za določanje karakteristike modela sončne celice. Napetost kondenzatorja (U) je časovno odvisna od polnjenja kondenzatorja. Za enačbo (23) smo izrisali graf odvisnosti toka od napetosti, kjer je napetost bila med 0 in 0,5V; ostale spremenljivke pa enake kot pri modelu diode v simulaciji, z izjemo serijske in paralelne upornosti, ki smo jih pri matematičnem modulu zanemarili.

V Orcad PSpice-u smo modelirali model sončne celice. Model smo snovali tako, da sta kratkostični tok ter napetost odprtih sponk približno $I_{ks}=8\text{A}$ in $U_{os}=0,5\text{V}$. To smo storili z ustrezno spremembo paralelne upornosti ter serijske upornosti modela sončne celice. Potrebni so bili tudi popravki modela diode. Maksimalni diodni tok mora biti enak ali večji kot kratkostični tok (I_{ks}). V kolikor je premajhen, je vpliv diodne karakteristike na celico premajhen oz. je vpliv uporov večji in ima zaradi tega model sončne celice uporovno karakteristiko.

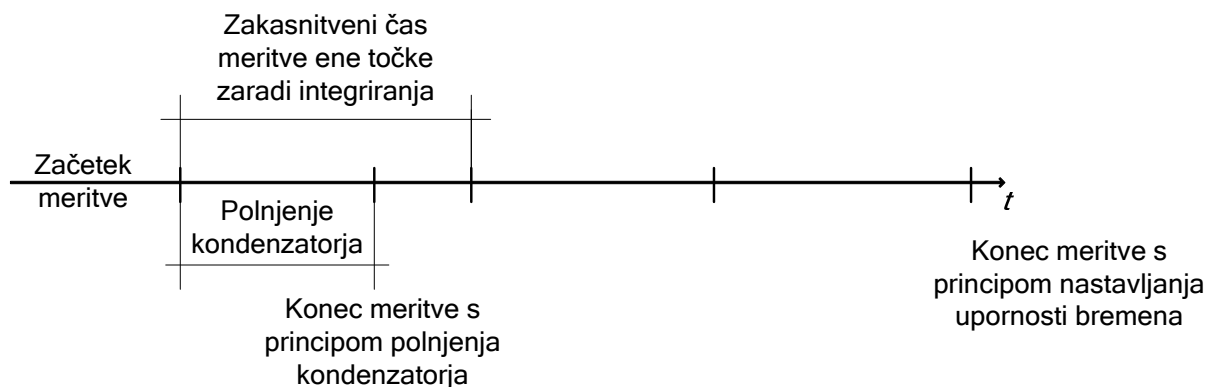


Graf 8: Karakteristika simulacije in matematičnega modela.

Simulirani model je vseboval naslednje parametre: $R_s=10\text{ m}\Omega$; $R_p=100\text{ }\Omega$; $I_i=8\text{ A}$; $C=10\text{ mF}$; $N=0,8$; $T=25^\circ\text{C}$. Pri risanju grafa smo predpostavili, da sta $R_p=\infty$ in $R_s=0$. Krivulja, izrisana z matematičnim modelom, pričakovano odstopa od tiste, izrisane s podatki simulacije. Razlika med krivuljama se pojavi zaradi napake v karakteristiki, ki jo povzročita paralelna (R_p) in serijska (R_s) upornost. Iz tega lahko sklepamo, da sta krivulji skladni, če ju upoštevamo v matematičnem modelu. Skladnost v našem primeru ni nujna, saj je dovolj podobnost med njima. Simulacija je potrdila naš matematični model principa polnjenja kondenzatorja. S tem smo dokazali, da je merjenje karakteristike FN modulov s principom polnjenja kondenzatorja pravilen.

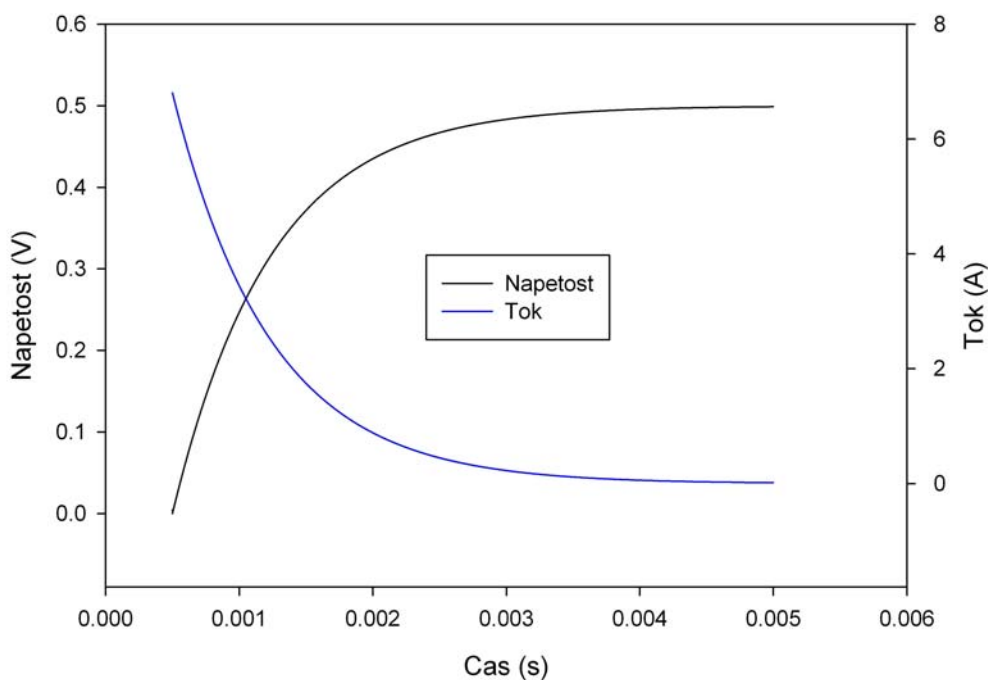
4.2 Princip meritve polnjenja kondenzatorja je hitrejši kot uporovni način

Uporovni način zahteva nastavljanje bremenske upornosti ter hkratno meritev toka in napetosti. Zaradi integriranja PWM signala iz mikroprocesorja se ta nekoliko zakasni. Želena napetost na upor, ki določa odprtje bremenskega MOSFETA in s tem velikost bremena, je dosežena šele čez določen čas.



Slika 26: Razlika v času med principoma.

Ugotovitev, da je čas polnitve premo sorazmeren z velikostjo kondenzatorja, nam omejuje izbiro velikosti kondenzatorja le s hitrostjo vzorčenja oz. odzivnosti mikroprocesorja. Sledila je določitev časa, v katerem se mora kondenzator napolniti. Čas meritve naj bo 5 ms s hitrostjo vzorčenja 20 kHz, kar bo omogočalo več meritev v zelo kratkem času.



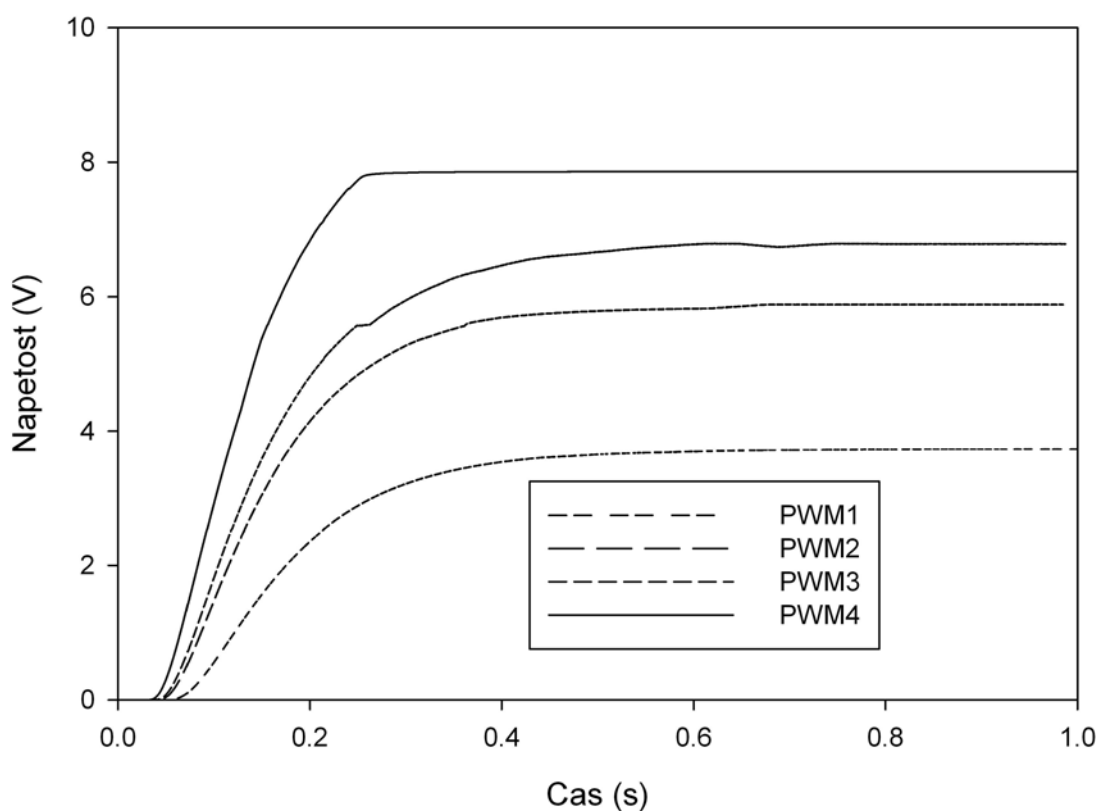
Graf 9: Polnjenje kondenzatorja.

Kondenzator s kapacitivnostjo 10 mF , pri pogojih $R_s=1\text{ m}\Omega$; $R_p=62.5\text{ m}\Omega$; $I_{ks}=8\text{ A}$; $U_{os}=0,5\text{ V}$; se napolni v želenem času 5 ms . V kolikor je čas zakasnitve bremenskega MOSFETa daljši od 5 ms , je meritev s principom nastavljivega upora časovno konkurenčna meritvi s kondenzatorjem.

Z dajalnikom napetostnih impulzov VPULSE, smo simulirali PWM izhod mikrokrmilnika in ga preko integratorja ter optosklopnika povezali z bremenskim MOSFETom. Simulirali smo pet različnih nastavitev PWM ter izmerili povprečen čas zakasnitve. V tabeli 1 in grafu 10 so prikazani rezultati simulacij treh različnih nastavitev PWM. Zanimal nas je predvsem čas zakasnitve.

Simulacija	1.	2.	3.	4.
PWM (%)	40	48	52	60
Zakasnitveni čas (ms)	500	517	581	330

Tabela 1: Zakasnitveni čas integratorja

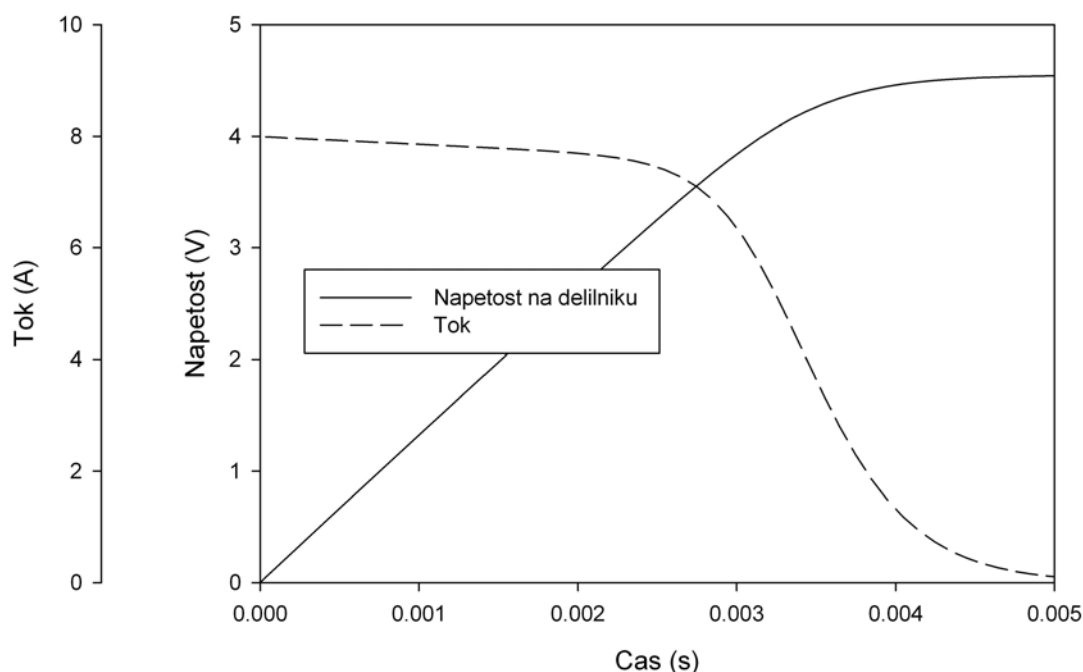


Graf 10: Zakasnitev povprečevanja.

Iz grafa in tabele preberemo, da zakasnitveni čas ni odvisen od pulzno širinske modulacije, ampak od integralnega člena. Spreminjanje PWM nima večjega vpliva na čas zakasnitve sistema, saj je čas zakasnitve v vseh primerih enak z majhnimi odstopanji. Glede na opravljene simulacije in velikost zakasnitvenega časa, lahko sklepamo, da je merilni princip s polnjenjem kondenzatorja bistveno hitrejši. Dosegel približno dvajsetkrat krajši čas kot je čas zakasnitve integralskega člena zaradi povprečevanja. Hipotezo, da je princip meritve s kondenzatorjem hitrejši kot uporovni način, smo zaradi zgoraj naštetih dejstev potrdili.

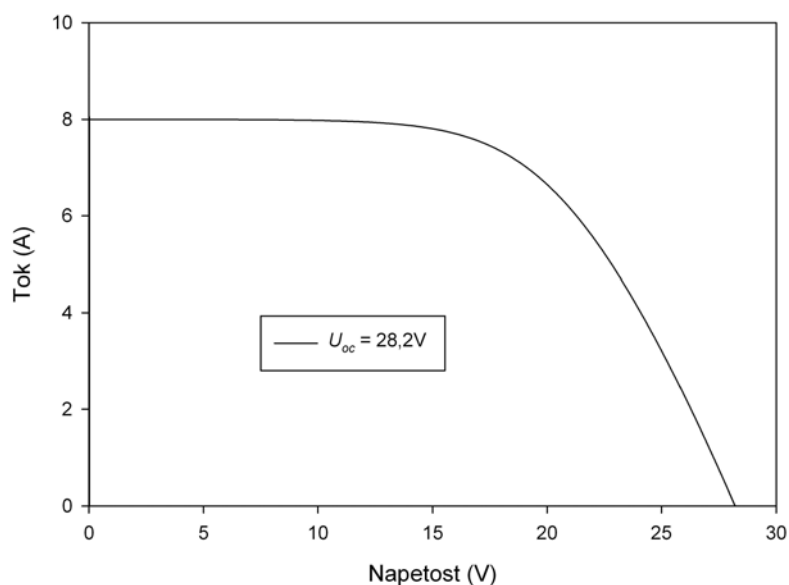
4.3 Razširitev merilnega območja merilnika

Merilnik se bo lahko uporabljal za merjenje posameznih sončnih celic, posameznih fotonapetostnih modulov in nizov fotonapetostnih modulov le s spremembo dopustnih parametrov izhodnih elementov. Parametri morajo biti takšni, da zagotavljajo enake signale merilnega in procesnega dela. Simulirali smo FN modul, tako da smo zaporedno vezali 60 modelov celice. Spreminjali smo kapacitivnost kondenzatorja, da se je napolnil in prešel v stacionarno stanje po 5ms. Za celotno potrditev hipoteze smo dodali primeren napetostni delilnik, ki deli napetost, da jo lahko izmerimo z A/D pretvornikom mikroprocesorja. Merilnika toka nismo vključili v simulacijo, saj proizvajalec izbranega ponuja izbiro več modelov z različnimi vhodnimi tokovi in enakim razponom izhodnega signala. Proizvajalec nam poda odvisnost merjenega toka od izhodnega signala in tako lahko izračunamo merjeni tok. Signal mora v našem primeru doseči največjo vrednost merjenja napetosti oz. najmanjšo vrednost toka v 5ms. Največja dovoljena vrednost, ki je pogojena z merilnim območjem A/D pretvornika, je 5V in jo v primeru, da je večja, ustrezno zmanjšamo z napetostnim delilnikom.



Graf 11: Meritev karakteristike FN modula.

Iz grafa 11 razberemo, da smo samo s spremembo vhodnih parametrov kondenzatorja in uporovnega delilnika, dobili signal o meritvi napetosti, ki ustreza zahtevanemu. Za določanje in izrisovanje karakteristike je potrebno te signale obdelati, saj je napetost ustrezno zmanjšana in jo je potrebno pomnožiti s koeficientom napetostnega delilnika $k = 1 + R_1/R_2$. Koeficient meritve toka je odvisen od modela merilnika toka in je podan v navodilih proizvajalca. Ker smo pri simulaciji merili tok neposredno, nam tega ni potrebno storiti in smo množili le koeficient napetostnega delilnika. Na grafu 12 je prikazana karakteristika modela modula, ki je rezultat simulacije s PSpicem.

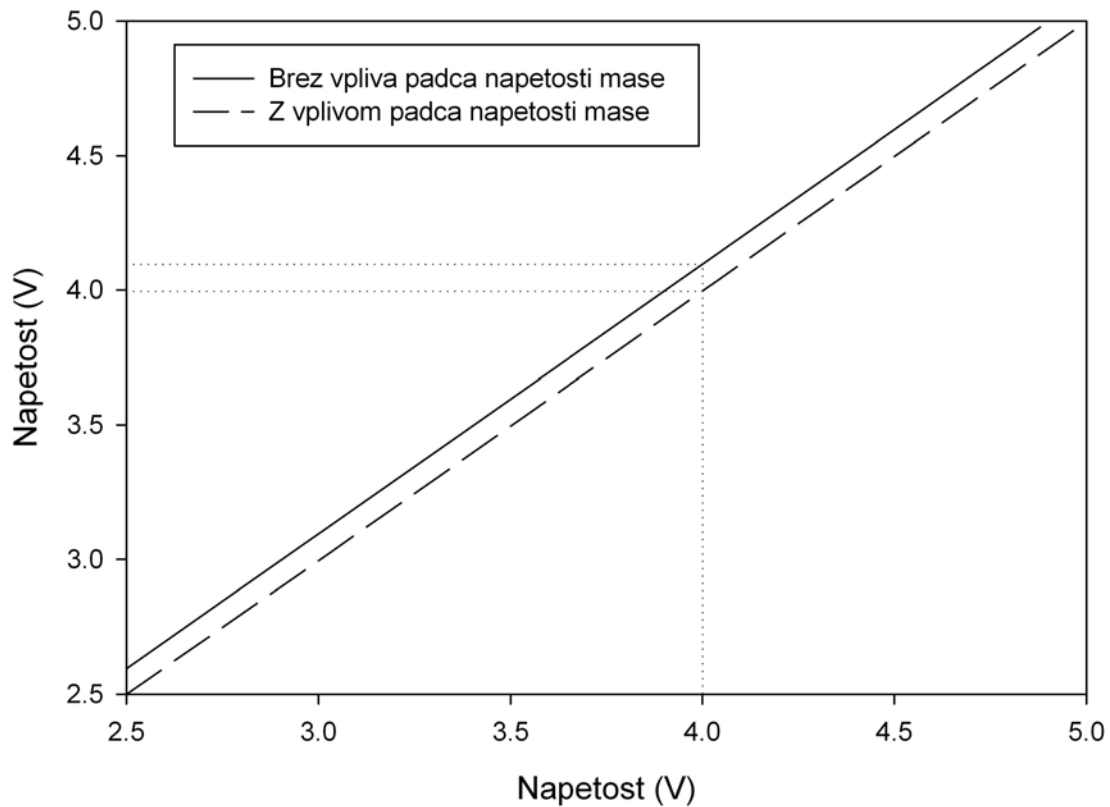


Graf 12: UI karakteristika FN modul.

S simulacijo smo dokazali, da lahko merilno območje merilnika razširimo le s spremembo vhodnih parametrov. Osnovo merilnika lahko tako uporabljamo za merjenje karakteristike FN celic, FN modulov ali nizov FN modulov le s spremembo vhodnih parametrov, in zaradi tega potrjujemo hipotezo.

4.4 Optična ločitev močnostnega in merilnega dela vpliva na točnost merilnika

Z izolacijskim ojačevalnikom poizkušamo odstraniti vpliv sistemske napake padca napetosti na masi. V kolikor sistem ni optično oz. galvansko ločen, lahko tok, ki teče po masi, zaradi njene upornosti, na njej povzroča padec napetosti. Padec napetosti preprečimo, če močnostni del, v katerem tečejo večji tokovi, ki lahko povzročijo tovrstne padce, optično ločimo od merilnega. S simulacijo smo želeli dokazati vpliv padca napetosti na povečanje sistemske napake merilnika. Simulirali smo diferencialni ojačevalnik, kateremu smo na vhodno stopnjo nižjega potenciala dodali potencialno napetost mase. Vhodna signala smo opazovali v odvisnosti od izhodnega, ko masa ni povzročala sistemske napake in ko smo na vhod pripeli motnjo v obliki napetosti mase.

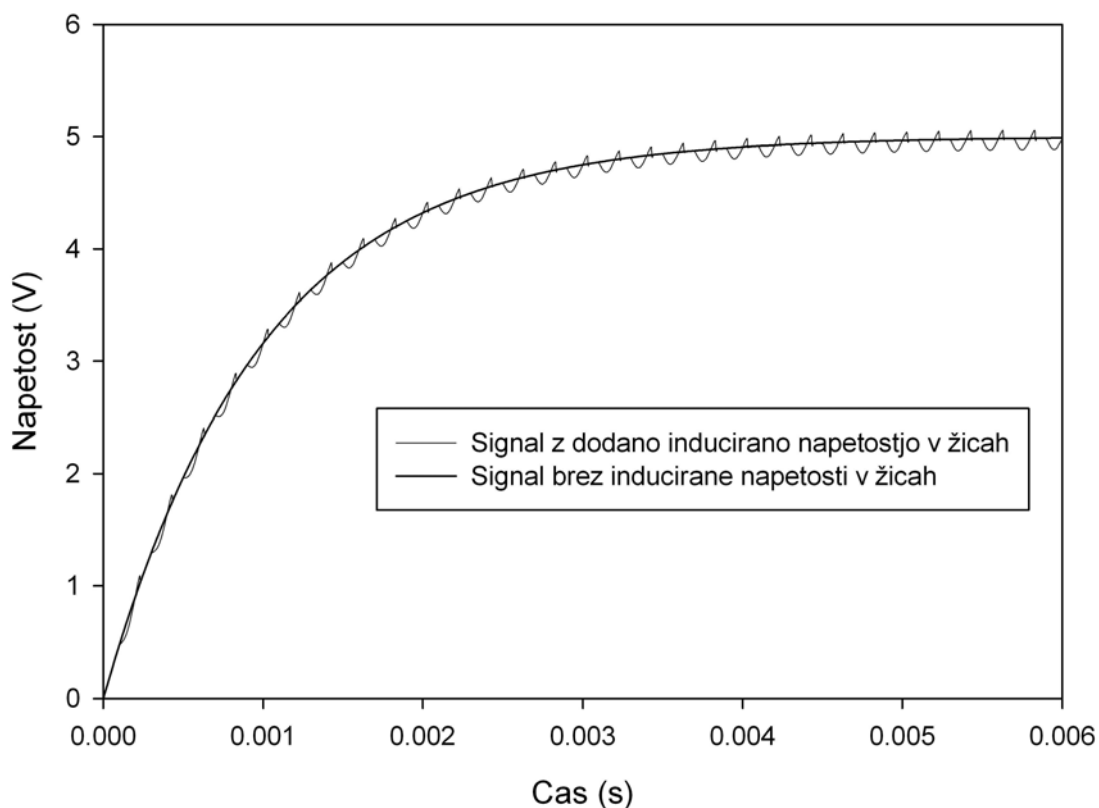


Graf 13: Vpliv padca napetosti na masi točnost merilnika.

Na *grafu 13* je prikazana odvisnost med vhodnim in izhodnim signalom diferencialnega ojačevalnika. Iz grafa razberemo, da je odstopanje od realne vrednosti signala z dodano napetostjo mase očitno. Z optično ločitvijo to napako odpravimo, saj masa ni galvansko povezana z močnostnim sklopom. Potrdimo lahko hipotezo, da optična ločitev vpliva na točnost merilnika in sicer zagotavlja večjo točnost in odpravlja sistemsko napako.

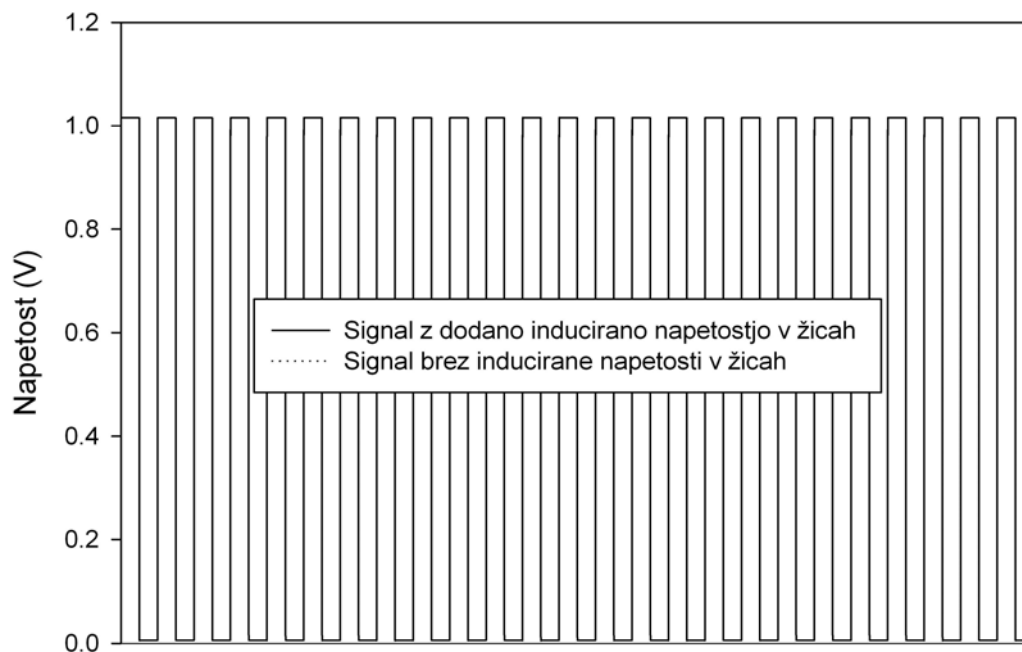
4.5 Meritev bo natančnejša, če se izvaja v neposredni bližini fotonapetostnega modula, prenos podatkov pa poteka v digitalni obliki.

Analogni signali so tisti signali, ki se zvezno spreminjajo skozi čas. Zavzemajo lahko vrednosti med najmanjšimi in največjimi možnimi signali. Digitalni signali so diskretni signali, ki lahko zavzamejo le dve vrednosti, logično enko in logično ničlo. Z zaporedjem logičnih enk in ničel prenašamo vrednost signala. Prednost takšnega signala je, da prenos podatkov v digitalni obliki ni tako občutljiv na zunanje dejavnike kot je prenos podatkov v analogni obliki. Zunanji dejavniki, na primer inducirana napetost, se pojavi zaradi bližine magnetnih polj. Ko po žicah teče tok, ta povzroča magnetno polje okoli vodnika. Vodniki analognih signalov tako vplivajo poleg zunanjih dejavnikov še drug na drugega. Inducirana napetost ni konstantna in zaradi tega povzroča naključno napako, ki se od meritve do meritve razlikuje. Simulirali smo prenos analognega signala in digitalnega signala z inducirano napetostjo na žicah ter opazovali, kakšen je vpliv le-tega na prenos signala. Velikost inducirane napetosti smo glede na velikost merjenega toka določili okoli 100 mV. Inducirana napetost v žicah je naključni signal, vendar v sofazi na vseh žicah. *Graf 14* prikazuje rezultate simulacije z dodano inducirano napetostjo, ki se inducira v žicah pri prenosu signala. Inducirana napetost vpliva na analogni signal tako, da ga popači. Popačenje signala je enako inducirani napetosti, katere ne moremo predvideti, saj je odvisna od prevelikega števila dejavnikov. Zaradi tega inducirana napetost pri prenosu signala vpliva na naključno napako merilnika.



Graf 14: Vpliv inducirane napetosti na analogni signal.

V primeru prenosa v digitalni obliki inducirana napetost ne vpliva na signal. Digitalni signal, prikazan na *Grafu 15*, ostane nespremenjen za enako inducirano napetost kot v primeru analognega signala. Hipoteza je tako potrjena. Meritev se bo izvajala v neposredni bližini FN modula, prenos podatkov pa potekal v digitalni obliki.



Graf 15: Vpliv inducirane napetosti na digitalni signal.

5. RAZPRAVA – Merilnik kot del nadzornega sistema

Meritev karakteristike FN modulov s principom polnjenja kondenzatorja, se je izkazal za bolj enostavnega, hitrejšega ter natančnejšega, kot princip stacionarnega nastavljanja upornosti. Ugotovili smo, da je potrjevanje hipotez s simulacijami zelo zanesljivo in hitreje kot izdelava posameznih tiskanih vezij. Predvsem moramo biti pozorni na naključne napake, ki zmanjšujejo natančnost merilnika in sistemske napake, ki zmanjšujejo njegovo točnost. Točnost merilnika določamo s pravilno izbiro komponent merilnega sklopa, ki morajo imeti linearne karakteristike vhodno-izhodnega prenosa za doseg ustrežne točnosti merilnika. Pomembno vlogo pri tem ima optična ločitev močnostnega in merilnega dela, saj na ta način preprečimo, da tokovi iz močnostnega dela povzročajo padce napetosti na masi. Ker meritev poteka v neposredni bližini modula, je vpliv zunanjih dejavnikov na meritev minimalen. Pravilno izbrani princip meritve, način prenosa podatkov in konfiguracije komponent so ključnega pomena pri določitvi kakovosti in cene merilnika. S tem, ko kompleksnejše in dražje diferencialne ojačevalnike nadomestimo z ceneni operacijskimi ojačevalniki in izolacijske ojačevalnike z optosklopnikom in ojačevalnikom, bistveno zmanjšamo ceno merilnika. Kakovost merilnika zaradi tega ostane približno ista oz. zadovoljiva. Natančnost in točnost sta ključnega pomena pri določitvi stopnje degradacije, saj majhna odstopanja od realne vrednosti degradacije posameznega modula nanesejo relativno veliko napako pri določitvi stopnje degradacije fotonapetostnega sistema. Velika prednost merilnika je, da se bo lahko uporabljal prav tako za merjenje karakteristike polja FN modulov, FN modulov, kot sončnih celic, le s spremembo konfiguracij kondenzatorja, merilnega upora in merilnika toka. Digitalna komunikacija med računalnikom in merilnikom omogoča postavitev mreže merilnikov brez vpliva induciranih napetosti s preprostim vmesnikom in tako določevanje stopnje degradacije posameznih modulov v polju. Neposredni vpogled in določitev stopnje degradacije sistema FN modulov omogoči ponudniku sončne elektrarne preverjanje kakovosti, ki jo zagotavlja proizvajalec FN modulov. Ponudniku je s tem omogočen prenos stroškov, ki nastanejo zaradi nezagotavljanja izplena na proizvajalca modulov. S stalnim preverjanjem kakovosti pa proizvajalec v vsakem trenutku zagotavlja kakovost svojih modulov. Naslednja stopnja raziskave je izdelava merilnika ter preizkušanje njegovega delovanja na različnih FN modulih.

6. ZAKLJUČEK

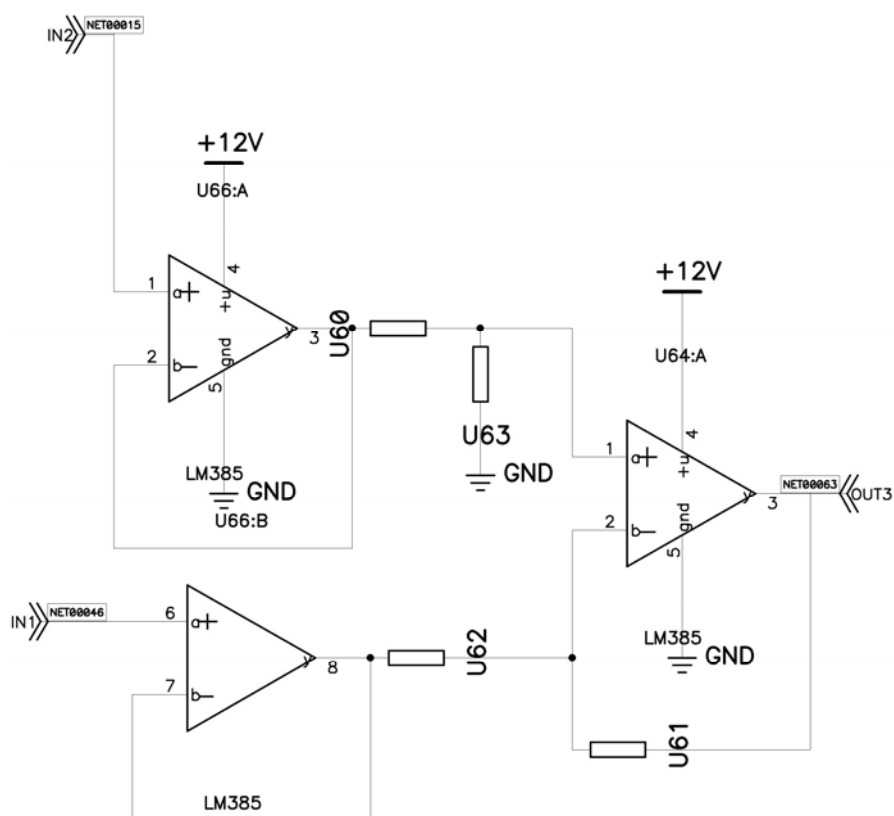
Rezultati razskave so pokazali, da je princip merjenja karakteristike FN modulov bolj enostaven, hitrejši ter pri večjih močeh celo bolj natančen kot princip z nastavljanjem upornosti bremena. Optična ločitev močnostnega in merilnega dela poveča točnost merilnika, medtem ko jo nelinearnost vhodno izhodnih signalov zmanjšuje. Meritev v neposredni bližini modula in digitalni prenos podatkov do računalnika je natančnejša, saj napetosti, ki se inducirajo v žicah, pri prenosu na digitalni signal nimajo vpliva. Merilnik je uporaben za merjenje karakteristike vseh vrst FN generatorjev le s spremembo konfiguracij napetostnega delilnika, merilnika toka ter bremenskega kondenzatorja. Za delovanje merilnika bo potrebna še izdelava algoritmov za zajemanje podatkov o meritvi ter uporabniškega vmesnika za prikaz karakteristik.

7. ZAHVALA

Zahvaljujem se svojemu mentorju dr. Gregorju Černivcu, ki se je kljub svoji časovni obremenjenosti vseskozi izkazoval kot odličen mentor, z nepogrešljivimi kvaliteta, katere so pripomogle pri izdelavi raziskovalne naloge. Zahvaljujem se tudi g. Marku Poličniku za omogočeno seznanitev z mentorjem v podjetju Bisol, d.o.o in vsem ostalim, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi raziskovalne naloge.



Diferencialni ojačevalnik



9. REFERENCE

- [1] http://sl.wikipedia.org/wiki/Son%C4%8Dna_celica, 20. februar
- [2] Medved, S., Novak, P., Varstvo okolja in obnovljivi viri energije, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2000
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Cell_temperature, 21 februar
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Series_resistance, 26. februar
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Shunt_resistance, 20. februar
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Reverse_saturation_current, 20. februar
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Ideality_factor, 20. februar
- [8] http://sl.wikipedia.org/wiki/To%C4%8Dnost_in_natan%C4%8Dnost, 20. februar
- [9] <http://www.netrino.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>, 20. februar
- [10] Zapiski, Dr. Gregor Černivec
- [11] http://lrt2.fe.uni-lj.si/lrtme/meri_pret/PREDAVANJE_2_Lorentz2.pdf, 13. februar
- [12] http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf, 11. februar
- [13] Lorencon, R. Elektronski elementi in vezja, 2. dopolnjena izd. – Nova gorica: Maya d.o.o
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation, 14. februar
- [15] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf, 2. februar
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus, 28. februar
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver/transmitter, 11. februar
- [18] Šuhel, P. Industrijska elektronika; operacijski ojačevalniki v sistemih, 1. preurejena izd. – Mengeš: D design, 1995
- [19] <http://canteach.candu.org/library/20030701.pdf>, 16. februar
- [20] http://saturn.unimb.si/~bojan/pr_pr1_pdf/primerjava%20simulatorjev_popravl%20ICAP_MIC_ROCAP1.pdf, 14. februar