



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Uglješa Z. Jovanović

BESKONTAKTNI METOD MERENJA TEMPERATURE FOTONAPONSKIH MODULA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tekst ove doktorske disertacije stavlja se na uvid javnosti,
u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju
("Sl. glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007 – autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012,
89/2013 i 99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst smatra se rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i
srodnim pravima, "Sl. glasnik RS", br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

**Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti ni u kakve svrhe,
osim za upoznavanje sa njenim sadržajem pre odbrane disertacije.**

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Uglješa Z. Jovanović

**NON-CONTACT TEMPERATURE
MEASUREMENT OF PHOTOVOLTAIC
MODULES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: Prof. dr Dragan Mančić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu

Naslov: Beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula

Porast temperature fotonaponske ćelije iznad 25°C prouzrokuje smanjenje njene izlazne snage, zbog čega je njeno tačno merenje u naučnim aplikacijama i u praksi apsolutno neophodno. Nažalost, u literaturi se ne može naći mnogo materijala koji se bavi ovom problematikom. Osnovni cilj ove doktorske disertacije je povećanje tačnosti merenja temperature fotonaponskih modula.

Realizacija navedenog počinje od teorijskog uvoda u osnovne parametre fotonaponske ćelije, a zatim obuhvata analizu matematičkih modela za procenu temperature fotonaponske ćelije. Potom je izvršena teorijska analiza procesa merenja temperature nekog tela kontaktnim temperaturnim senzorima, nakon čega je dat kratak osvrt na njih, odnosno na njihove prednosti i nedostatke u procesu merenja temperature fotonaponske ćelije nekog fotonaponskog modula.

Temeljna analiza najčešće korišćenih metoda za merenje temperature fotonaponskih ćelija zasnovanih na kontaktnim temperaturnim senzorima pruža odličan uvid u njihove elementarne nedostatke. Analizirajući te nedostatke, moguće je realizovati odgovarajuće metode za njihovu kompenzaciju.

Poseban akcenat doktorske disertacije je na eksperimentalnoj potvrdi nedovoljne tačnosti merenja temperature kontaktnim senzorima. U tu svrhu, primenjen je odgovarajući referentni instrument visoke tačnosti. U okviru ovog dela disertacije izvršena je realizacija ekonomičnog, a preciznog akvizicionog sistema za merenje temperature zasnovanog na temperaturnom senzoru Pt100.

Osim merenja temperature zasnovanog na kontaktnim senzorima, fokus doktorske disertacije je i na merenju temperature pomoću beskontaktnog senzora, kojim bi se nadoknadili nedostaci kontaktnih senyora. Serijom sprovedenih eksperimenata u laboratorijskim i realnim uslovima rada, potvrdila se opravdanost upotrebe beskontaktnog senzora, odnosno dobila se veća tačnost njegovih merenja u odnosu na uporedna merenja dobijena kontaktnim senzorima.

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Naučna disciplina: Elektronika

Ključne reči: Fotonaponski modul, merenje temperature, kontaktni temperaturni senzori, beskontaktni temperaturni senzori, tačnost merenja

UDK: 621.311.243:536.5

CERIF
klasifikacija: T 170 Elektronika

Tip
licence
Kreativne
zajednice:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: Prof. dr. Dragan Mančić, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering in Niš

Title: Non-contact temperature measurement of photovoltaic modules

Abstract: Temperature increase of photovoltaic cells above 25°C causes a decrease in its output power. That is why it is absolutely necessary to measure this temperature accurately. Unfortunately, there are no many materials dealing with this problem in the existing literature. The main goal of this doctoral dissertation is increase of temperature measurement accuracy of photovoltaic modules.

Realization of this goal starts from the theoretical introduction of the basic parameters of the photovoltaic cell, and then includes the analysis of mathematical models for estimation of the photovoltaic cell temperature. Then a theoretical analysis of the temperature measurement using contact temperature sensors has been made, after which a brief overview on contact temperature sensors was done, i.e. their advantages and disadvantages in temperature measurement of the photovoltaic modules.

A thorough analysis of the most frequently used solutions for temperature measurement of photovoltaic cells based on contact temperature sensors provides an excellent insight into their elementary drawbacks. By analyzing these drawbacks, it is possible to implement appropriate methods for their compensation.

A special emphasis of doctoral dissertation is on experimental confirmation of insufficient accuracy of temperature measurements using contact sensors, by employing an appropriate highly accurate reference instrument. Within this research, an economical and precise temperature measurement acquisition system based on a Pt100 temperature sensor has been realized.

In addition to temperature measurement based on contact temperature sensors, the focus of the doctoral dissertation is on the temperature measurement using a contactless sensor, which would compensate drawbacks of the contact sensors. Series of experiments conducted out in laboratory and real-life conditions justified the use of the contactless sensor, i.e. a greater accuracy of its measurements compared to comparative measurements obtained by contact sensors has been obtained.

Scientific Field: Electrical Engineering and Computer Science

Scientific Discipline: Electronics

Key Words: Photovoltaic module, temperature measurement, contact temperature sensor, non-contact temperature sensor, measurement accuracy

UDC: 621.311.243:536.5

CERIF Classification: T 170 Electronics

Creative Commons License Type: **CC BY-NC-ND**

I Autor	
Ime i prezime	Uglješa Z. Jovanović
Datum i mesto rođenja	01.03.1985. god., Zenica
Sadašnje zaposlenje	Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet u Nišu
II Doktorska disertacija	
Naslov	Beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula
Broj stranica	109
Broj slika	105
Broj tabela	2
Broj bibliografskih jedinica	88
Ustanova i mesto gde je disertacija urađena	Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu
III Ocena i odbrana	
Datum prijave teme disertacije	07.07.2017. god.
Datum javne prezentacije teme za doktorsku disertaciju	27.09.2017. god.
Broj odluke i datum prihvatanja teme disertacije	NSV broj 8/20-01-007/17-017, 09.10.2017. god.
Komisija za ocenu podobnosti teme doktorske disertacije	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dragan Mančić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 2. Dragan Pantić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 3. Goran Stančić, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 4. Dragan Živanović, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 5. Zoran Pavlović, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet
Komisija za odbranu doktorske disertacije	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dragan Mančić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 2. Dragan Pantić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 3. Goran Stančić, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 4. Dragan Živanović, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 5. Zoran Pavlović, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet
Datum odbrane:	

Anđi s ljubavlju

Zahvalnica

Želeo bih da se zahvalim mentoru prof. dr Draganu Mančiću na dragocenoj stručnoj pomoći i stalnom podsticaju tokom izrade disertacije. Takođe, izuzetnu zahvalnost dugujem kolegama iz Laboratorije za termoviziju i Sentronisa za pruženu pomoć tokom rada i izrade ove disertacije, kao i članovima Komisije za korisne sugestije tokom pisanja ove disertacije.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojoj porodici na bezrezervnoj podršci, razumevanju i stalnom podstreku tokom mog celokupnog školovanja i izradi ove disertacije.

*Autor
Mart, 2018.*

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. UTICAJ TEMPERATURE NA PARAMETRE PV MODULA	4
2.1 Matematički model PV ćelije	8
2.1.1 Jednodiodni model PV ćelije.....	8
2.1.2 Dvodiodni model PV ćelije	14
2.2 Modeli za proračun temperature PV modula.....	15
2.2.1 Ross-ov model za proračun temperature PV modula.....	17
2.2.2 Sandia model za proračun temperature PV modula	17
2.2.3 Servant-ov temperaturni model PV modula.....	18
2.2.4 David Faiman-ov model za proračun temperature PV modula.....	19
2.2.5 NOCT model za proračun temperature PV modula	19
2.3 Realizacija jednodiodnog modela PV ćelije.....	20
3. SENZORI ZA MERENJE TEMPERATURE PV MODULA.....	23
3.1 Otporni temperaturni senzori.....	26
3.2 Termistori	28
3.3 Termoparovi	30
3.4 Poluprovodnički temperaturni senzori.....	31
3.5 Infracrveno merenje temperature.....	33
3.6 Četvorožično merenje otpornosti RTD temperaturnih senzora	37
4. NAČINI MERENJA TEMPERATURE PV MODULA.....	39
4.1 Rešenje zasnovano na Pt100 senzoru	39
4.2 Rešenje zasnovano na NTC senzoru.....	43
4.3 Rešenje zasnovano na senzoru DS18B20.....	47
4.4 Rešenja sa termičkom izolacijom temperaturnih senzora	52
5. PROJEKTOVANJE I REALIZACIJA SOPSTVENIH SISTEMA ZA MERENJE TEMPERATURE PV MODULA	57

5.1	Sistem zasnovan na RTF senzoru	57
5.2	Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru DS18B20	63
5.3	Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru DS18B20Z.....	69
5.4	Temperaturna sonda bazirana na temperaturnom senzoru DS18B20.....	72
5.5	Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru Pt100.....	76
5.6	Sistem zasnovan na IR temperaturnom senzoru MLX90614	86
6.	ANALIZA I DISKUSIJA OSTVARENIH REZULTATA.....	94
7.	REFERENCE	99

Spisak slika:

Slika 2.1 Struktura PV ćelije	5
Slika 2.2 Izgled PV ćelije	5
Slika 2.3 Definicija faktora ispune	7
Slika 2.4 Izgled PV modula.....	8
Slika 2.5 Ekvivalentna šema PV ćelije.....	9
Slika 2.6 I-V karakteristika tipične PV ćelije na temperaturi od 25°C.....	10
Slika 2.7 Ekvivalentna šema PV ćelije sa paralelnim otpornikom.....	10
Slika 2.8 Uticaj paralelne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije	11
Slika 2.9 Ekvivalentna šema PV ćelije sa rednim otpornikom	11
Slika 2.10 Uticaj redne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije.....	12
Slika 2.11 Najčešće korišćena ekvivalentna šema PV ćelije.....	13
Slika 2.12 Uticaj paralelne i redne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije	13
Slika 2.13 Ekvivalentna šema PV ćelije dvodiognog modela.....	14
Slika 2.14 Promena napona i struje PV modula sa temperaturom	15
Slika 2.15 Uticaj temperature na I-V karakteristiku PV ćelije.....	16
Slika 2.16 Smanjenje izlazne snage PV modula od 250 W sa temperaturom.....	16
Slika 2.17 Šema jednodiodnog modela PV ćelije	20
Slika 2.18 Poređenje modelirane i kataloške I-V karakteristike modula [44].....	22
Slika 2.19 Poređenje modelirane i kataloške karakteristike snage PV modula [44].....	22
Slika 3.1 Prenos toplote sa tela na senzor	23
Slika 3.2 Promena temperature kontaktnog temperaturnog senzora:.....	25
Slika 3.3 Izgled RTD temperaturnih senzora u obliku tankog filma i kalema	27
Slika 3.4 Prenosna karakteristika NTC termistora	28
Slika 3.5 Izgled tipičnog termistora	29
Slika 3.6 Izgled tipičnog savitljivog termopara.....	31
Slika 3.7 Kolo PTAT temperaturnog senzora	32
Slika 3.8 Izgled poluprovodničkog analognog temperaturnog senzora LM35	33
Slika 3.9 Raspodela apsorbovanog, reflektovanog i propuštenog zračenja	33
Slika 3.10 Poređenje između brzine odziva kontaktnih i beskontaktnih senzora	35
Slika 3.11 Izgled tipičnog temperaturnog senzora IR zračenja.....	35
Slika 3.12 Usmeravanje IR senzora na mernu površinu	36
Slika 3.13 Šema dvožičnog merenja otpornosti	37

Slika 3.14 Šema četvorožičnog merenja otpornosti	38
Slika 4.1 Blok dijagram sistema predstavljenog u radu [65]	40
Slika 4.2 Šema sistema realizovanog u radu [65]	41
Slika 4.3 Implementacija sistema realizovanog u radu [65]	41
Slika 4.4 Rezultati testiranja u radu [65]	42
Slika 4.5 Blok šema sistema realizovanog u radu [67]	43
Slika 4.6 Šema raspodele NTC termistora na PV modulu u radu [67]	44
Slika 4.7 Rezultati testiranja sistema realizovanog u radu [67]	45
Slika 4.8 Izgled sistema realizovanog u radu [68]	46
Slika 4.9 Način montaže NTC termistora na PV modul u radu [68].....	46
Slika 4.10 Struktura temperaturne sonde u radu [69].....	47
Slika 4.11 Izgled temperaturne sonde u radu [69].....	47
Slika 4.12 Blok dijagram sistema realizovanog u radu [69]	48
Slika 4.13 Razlika između uporednih merenja u radu [69].....	48
Slika 4.14 Montaža senzora u radu [69].....	49
Slika 4.15 Rezultati testiranja u realnim uslovima u radu [69].....	49
Slika 4.16 Razlika između uporednih merenja na nivou od nekoliko meseci u radu [69].....	50
Slika 4.17 Izgled modifikovane temperaturne sonde u radu [71]	51
Slika 4.18 Modifikovani temperaturni sistem u radu [71] tokom upotrebe	51
Slika 4.19 Način montaže temperaturnog senzora DS18B20 u radu [72].....	52
Slika 4.20 Način montaže temperaturnih senzora na PV modul u radu [73]	53
Slika 4.21 Povezivanje temperaturnih senzora na PV modul u radu [73].....	53
Slika 4.22 Raspored laminiranih senzora u radu [73]	54
Slika 4.23 Rezultati testiranja u radu [73].....	54
Slika 4.24 Uticaj debljine stiropora na tačnost merenja u radu [73]	55
Slika 5.1 Temperaturni senzor RTF4 [66].....	57
Slika 5.2 Termovizijska kamera Jenoptik Varioscans 3021ST	58
Slika 5.3 Rezultati laboratorijskog testiranja senzora RTF4	59
Slika 5.4 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja senzora RTF460	
Slika 5.5 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada senzora RTF4	60
Slika 5.6 Razlika između uporednih merenja testiranja u realnim uslovima rada senzora RTF4	61
Slika 5.7 Uticaj vetra na tačnost merenja senzora RTF4	62
Slika 5.8 Izgled realizovanog sistema sa senzorom DS18B20	63

Slika 5.9 Izgled prozora realizovanog virtuelnog instrumenta.....	64
Slika 5.10 Merna postavka provere tačnosti merenja dva senzora DS18B20.....	65
Slika 5.11 Rezultati provere tačnosti merenja dva senzora DS18B20.....	65
Slika 5.12 Razlika između uporednih merenja dva senzora DS18B20 za zadatu temperaturu	66
Slika 5.13 Montaža temperaturnog senzora DS18B20 na PV modul	67
Slika 5.14 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20.....	67
Slika 5.15 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20.....	68
Slika 5.16 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20.....	68
Slika 5.17 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20.....	69
Slika 5.18 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z ...	70
Slika 5.19 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z.....	71
Slika 5.20 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z.....	71
Slika 5.21 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z.....	72
Slika 5.22 Izgled realizovane temperaturne sonde zasnovane na senzoru DS18B20	73
Slika 5.23 Rezultati laboratorijskog testiranja realizovane temperaturne sonde.....	74
Slika 5.24 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja temperaturne sonde.....	74
Slika 5.25 Rezultati testiranja temperaturne sonde u realnim uslovima rada	75
Slika 5.26 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja temperaturne sonde u realnim uslovima rada	75
Slika 5.27 Šema realizovanog sistema zasnovanog na temperaturnom senzoru Pt100	76
Slika 5.28 Podešavanje izlazne struje kola LT3092 [80]	77
Slika 5.29 Podešavanje izlazne struje kola LT3092 pomoću DAC konvertora [80]	78
Slika 5.30 Izgled realizovanog sistema zasnovanog na temperaturnom senzoru Pt100	79
Slika 5.31 Izgled realizovanog virtuelnog instrumenta.....	80
Slika 5.32 Rezultati testa realizovanog sistema sa promenljivom otpornošću opterećenja	81
Slika 5.33 Testiranje realizovanog sistema pri promenljivoj ambijentalnoj temperaturi.....	81
Slika 5.34 Rezultati testa realizovanog sistema pri promenljivoj ambijentalnoj temperaturi..	82

Slika 5.35 Poređenje između merenja realizovanog sistema i merenja sa multimetra Keysight 34410A	83
Slika 5.36 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100	84
Slika 5.37 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100.....	85
Slika 5.38 Rezultati testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100 u realnim uslovima rada	85
Slika 5.39 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100 u realnim uslovima rada	86
Slika 5.40 Blok dijagram IR temperaturnog senzora MLX90614 [83].....	87
Slika 5.41 Izgled realizovanog sistema zasnovanog na senzoru MLX90614	88
Slika 5.42 Izgled realizovanog virtuelnog instrumenta.....	88
Slika 5.43 Merna postavka laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614 [88]	89
Slika 5.44 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614 ..	90
Slika 5.45 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614	90
Slika 5.46 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru MLX90614	91
Slika 5.47 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614 u realnim uslovima rada.....	92
Slika 5.48 Odziv temperaturnih senzora DS18B20 i MLX90614.....	93

Lista skraćenica:

PV – (engl. Photovoltaic) fotonaponski

I-V – (engl. Current-Voltage) strujno-naponska

STC – (engl. Standard Test Conditions) standardni testni uslovi

ROMT – (engl. Realistic Operating Module Temperature) realna radna temperatura fotonaponskog modula

NOCT – (engl. Nominal Operating Cell Temperature) nominalna radna temperatura fotonaponske ćelije

RTD – (engl. Resistance Temperature Device) otporni temperaturni senzor

PTC – (engl. Positive Temperature Coefficient) pozitivni temperaturni koeficijent

NTC – (engl. Negative Temperature Coefficient) negativni temperaturni koeficijent

PTAT – (engl. Proportional to the Absolute Temperature) proporcionalan prema apsolutnoj temperaturi

IR – (engl. Infrared – IR) infracrveni

ADC – (engl. Analog-to-Digital Converter) analogno-digitalni konvertor

PC – (engl. Personal Computer) personalni računar

MCU – (engl. Microcontroller Unit) mikrokontroler

USB HID – (engl. Universal Serial Bus Human Interface Device) tip serijske komunikacije

TO – (engl. Transistor Outline) tranzistorsko kućište

SOIC – (engl. Small Outline Integrated Circuit) malo kućište integrisanog kola

DAC – (engl. Digital-to-Analog Converter) digitalno-analogni konvertor

FOV – (engl. Field of View) ugao polja vidljivosti

Lista simbola:

I_{SC} – struja kratkog spoja

U_{OC} – napon otvorenog kola

I_n – nominalna struja

U_n – nominalni napon

P_n – maksimalna snaga

F – faktor ispune

η – efikasnost

U_{mp} – napon tačke maksimalne snage

I_{mp} – struja tačke maksimalne snage

P_L – Sunčeva energija apsorbirana od strane fotonaponske ćelije

I_{PV} – struja fotonaponske ćelije

I_D – struja diode

q – naelektrisanje elektrona

k – Boltzmann-ova konstanta

T – apsolutna temperatura diode

γ – faktor idealnosti diode

I_0 – inverzna struja zasićenja diode

I_{0ref} – struja zasićenja pri referentnim uslovima

R_P – otpornost paralelnog otpornika

R_S – otpornost rednog otpornika

T_m – temperatura PV modula

T_a – ambijentalna temperatura

E – intenzitet Sunčevog zračenja

k_R – Ross-ov koeficijent

W_S – brzina vetra

a i b – koeficijenti dobijeni eksperimentalnim putem

a , d , e i f – empirijski koeficijenti dobijeni eksperimentalnim putem

U_0 – koeficijent koji opisuje uticaj iradijacije na temperaturu modula

U_1 – koeficijent koji opisuje efekat hlađenja vetrom

T_B – temperatura tela

T_S – temperatura koju temperaturni senzor meri

r_1 i r_2 – termičke otpornosti

α_1 – termalna provodnost između senzora i tela

t – temperatura na senzoru Pt100

R_0 – otpornost senzora Pt100 na 0°C

A , B i C – koeficijenti Pt100 senzora

k_1 i k_2 – koeficijenti poluprovodničkih temperaturnih senzora

ϕ – ukupno zračenje koje pada na telo

ϕ_a – zračenje koje telo apsorbuje

ϕ_r – zračenje koje se reflektuje od strane tela

ϕ_p – zračenje koje telo propušta

α_a – koeficijent apsorpcije

α_r – koeficijent refleksije

α_p – koeficijent propuštanja

j^* – gustina spektralnog zračenja

σ – Stefan- Boltzmann-ova konstanta

1. UVOD

Nagli porast ljudske populacije i industrijalizacije poslednjih decenija za posledicu ima sve veću potrošnju električne energije. Prema nekim procenama, godišnja potrošnja električne energije na globalnom nivou će se udvostručiti u narednih 30 godina. Osim toga, povećanje potrošnje energije i korišćenje fosilnih goriva, doveli su do povećanog zagađenja životne sredine usled velike emisije štetnih gasova, što za posledicu ima efekat staklene bašte i klimatske promene. Jedna od mera za ublažavanje nastalog stanja je povećanje učešća obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije.

Sunce, kao daleko najveći obnovljivi i neograničen izvor energije, predstavlja potencijal kakav trenutno nema ni jedan drugi izvor energije. Shodno tome, fotonaponske elektrane prema svim parametrima jednog savremenog elektroenergetskog sistema predstavljaju jednu od glavnih okosnica elektroenergetskog sistema budućnosti [1, 2, 3].

Ogroman napredak u tehnologiji proizvodnje fotonaponskih ćelija doveo je do višestrukog pada njihove cene, a samim tim i fotonaponskih modula [4, 5, 6, 7]. Kao posledica toga, došlo je porasta kapaciteta fotonaponskih elektrana priključenih na elektrodistributivnu mrežu.

U zavisnosti od materijala od kog je napravljen, kao i od ambijentalnih uslova, fotonaponski modul može konvertovati od 6 do 20% Sunčevog zračenja u električnu energiju, dok se preostalo Sunčevo zračenje pretvara u toplotu koja zagreva fotonaponski modul, usled čega se njegova efikasnost smanjuje. Dakle, temperatura fotonaponskog modula predstavlja važan parametar, jer zajedno sa intenzitetom Sunčevog zračenja određuje njegovu izlaznu snagu. Imajući to u vidu, ističe se važnost kontinuiranog praćenja vrednosti temperature na jednom ili više fotonaponskih modula u okviru neke fotonaponske elektrane. Sa druge strane, iako je temperatura fotonaponskih modula veoma bitan parametar, procesu njenog merenja do sada nije posvećeno dovoljno naučnog istraživanja, što za posledicu ima primenu većeg broja neadekvatnih, pa čak i potpuno netačnih metoda za njeno merenje.

Istraživanje sprovedeno u okviru ove doktorske disertacije baviće se procesom merenja temperature fotonaponskih modula. Dobri temelji svakog istraživanja najpre polaze od već postojećih saznanja, pa je tako na početku izvršena analiza nekih od najčešće

korišćenih tehnika za merenje temperature fotonaponskih modula koje se mogu sresti u naučnoj literaturi, sa osvrtom na elementarne nedostatke njihove implementacije.

U drugom poglavlju disertacije predstavljeni su osnovni parametri fotonaponskih ćelija, kao i njihova podela prema materijalu od kog su ćelije izrađene. Zatim su predstavljeni jednodiodni, dvodiodni i trodiodni matematički modeli fotonaponskih ćelija, koji se koriste u različitim simulacijama za proračun izlazne snage fotonaponskih modula. Pored toga, predstavljeno je nekoliko matematičkih modela za predviđanje temperature fotonaponskih modula na osnovu ambijentalnih parametara. U okviru ovog poglavlja predstavljen je jednodiodni model realizovan u softverskom paketu Matlab, koji će predstavljati osnovu u razvoju matematičkog modela za procenu temperature fotonaponskih modula. Jednodiodni model realizovan je po uzoru na modele koji se mogu naći u literaturi.

U trećem poglavlju dat je kratak osvrt na proces merenja temperature nekog tela primenom kontaktnih temperaturnih senzora. Zatim su navedene prednosti i nedostaci svih komercijalnih tipova kontaktnih temperaturnih senzora koji bi se mogli upotrebiti, odnosno koji se upotrebljavaju za merenje temperature fotonaponskih modula. Shodno tome, od kontaktnih temperaturnih senzora analizirani su Pt100, termistori, termoparovi i poluprovodnički senzori.

U četvrtom poglavlju izvršena je analiza najreprezentativnijih rešenja za merenje temperature fotonaponskih modula publikovanih u najeminentnijim naučnim časopisima. Analiza je sprovedena kako bi se definisale prednosti i mane trenutno zastupljenih rešenja, na osnovu kojih bi se pristupilo razvoju poboljšanih sopstvenih rešenja za merenje temperature PV modula.

U petom poglavlju izvršeno je testiranje pojedinih rešenja za merenje temperature predstavljenih u četvrtom poglavlju, nakon čega su predstavljene određene nadogradnje za povećanje njihove merne tačnosti. Osim toga, u ovom poglavlju realizovan je novi tip akvizicionog sistema visoke tačnosti zasnovan na kontaktnom temperaturnom senzoru Pt100. Na kraju je realizovan beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula baziran na infracrvenom temperaturnom senzoru. Neophodno je naglasiti da prema dostupnoj naučnoj literaturi nigde se ne analizira primena beskontaktnog načina za merenje temperature fotonaponskih modula. Validacija dobijenih merenja izvršena je u laboratoriji pri izotermalnim uslovima rada i na otvorenom prostoru, u realnim uslovima rada fotonaponskih modula pomoću referentnog instrumenta. Kao referentni instrument korišćena je termovizijska kamera velike tačnosti merenja. Dobijeni rezultati će nedvosmisleno

demonstrirati veću tačnost merenja predloženih rešenja u odnosu na postojeća, a prevashodno beskontaktnog načina merenja temperature fotonaponskih modula.

Dakle, u disertaciji se predlažu tehnike za povećanje tačnosti merenja trenutno korišćenih rešenja za merenje temperature fotonaponskih modula, kao i originalno rešenje veće tačnosti merenja u odnosu na trenutno korišćena.

Doprinos disertacije najbolje se može uočiti na osnovu eksperimentalnih rezultata, dobijenih primenom predloženih tehnika za povećanje tačnosti, odnosno primenom novih rešenja, koji imaju manju mernu grešku u odnosu na najčešće korišćena rešenja zasnovana na kontaktnim sensorima.

2. UTICAJ TEMPERATURE NA PARAMETRE PV MODULA

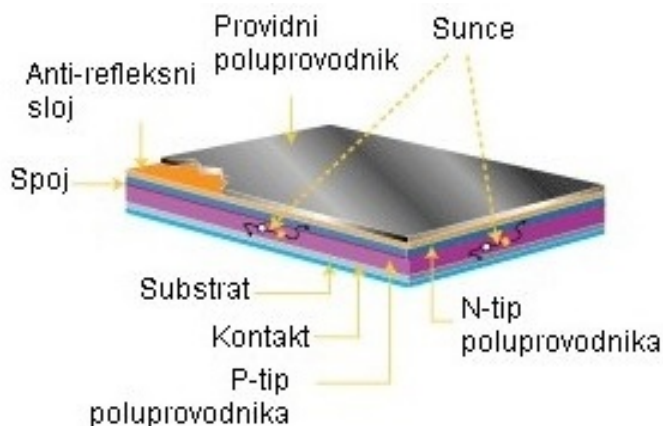
Temperatura je fizička veličina koja predstavlja stepen zagrejanosti nekog tela i predstavlja jednu od najčešće merenih fizičkih veličina [8]. U tehnološkim procesima na nju se odnosi gotovo 60% svih merenja.

Sunčevo zračenje predstavlja najveći i neiscrpan izvor energije na Zemlji, koji je ujedno dostupan na svim delovima njene površine. S obzirom na to da je Sunčeva energija besplatna i ne zagađuje životnu sredinu, sasvim je razumljivo zašto se u poslednje vreme ogromna pažnja posvećuje sistemima za iskorišćenje energije Sunčevog zračenja [9].

Efekat fotonaponske konverzije prvi je uočio francuski fizičar Edmond Becquerel 1839. godine, kada je registrovao pojavu naelektrisanja pri osvetljavanju dve identične elektrode potopljene u elektrolit.

Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja vrši se pomoću fotonaponskih (PV) ćelija izrađenih od poluprovodničkih materijala. PV ćelije ne zagađuju životnu okolinu, a karakteriše ih jednostavnost i dug vek trajanja, jer nemaju pokretnih delova. Prvu funkcionalnu PV ćeliju napravio je američki naučnik Charles Fritts 1883. godine, topljenjem selena u tankom sloju po metalnom supstratu preko koga je postavio aluminijumski film, koji je ujedno služio kao drugi kontakt [10]. Prvu PV ćeliju napravljenu od silicijuma, realizovao je 1941. godine američki inženjer Russell Ohl, pri čemu je njena efikasnost bila ispod 1% [11]. Calvin Fuller, Daryl Chapin i Gerald Pearson, iz firme Bell Laboratories, 1954. godine izradili su silicijumsku PV ćeliju sa efikasnošću od 6% i prvi PV modul, tzv. Bell-ovu solarnu bateriju [12]. Međutim, PV ćelije svoju prvu komercijalnu primenu dobijaju tek 1958. godine i to u napajanju satelita. Od tada predstavljaju nezamenljiv izvor električne energije na satelitima, svemirskim brodovima i stanicama.

Osnovu PV ćelije čini pn spoj, odnosno spoj dva poluprovodnička materijala, pri čemu su nosioci naelektrisanja kod p -tipa šupljine, a kod n -tipa elektroni. Pod dejstvom Sunčevog zračenja u obliku fotona dolazi do rekombinacije parova elektron-šupljina, usled čega se u PV ćeliji javlja električno polje, kao što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1 Struktura PV ćelije

Dakle, pod dejstvom Sunčeve svetlosti na kontaktima PV ćelije javlja se električni napon. Na ovaj način PV ćelija postaje fotodioda koja propušta struju samo u jednom smeru. Izgled jedne PV ćelije prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2 Izgled PV ćelije

PV ćelije se izrađuju od različitih tipova poluprovodničkih materijala, koji mogu biti složeni u različite strukture sa ciljem postizanja što bolje efikasnosti konverzije Sunčevog zračenja u električnu energiju [13, 14, 15, 16].

PV ćelije izrađene od monokristalnog silicijuma imaju tzv. jednoliku strukturu, odnosno sastoje se od istog materijala koji je modifikovan tako da je na jednoj strani ćelije *p*-tip, a na drugoj *n*-tip poluprovodnika. Unutar ćelije *pn* spoj je lociran tako da se maksimum Sunčevog zračenja apsorbira blizu spoja. Debljina ovih ćelija kreće se između 200 μm i 300 μm . Teorijska efikasnost im je oko 22%, dok se u realnim uslovima rada kreće do 15%. Osnovni nedostatak ovih PV ćelija predstavlja visoka cena njihove proizvodnje što je, pak, posledica komplikovanog proizvodnog procesa.

PV ćelije izrađene od polikristalnog silicijuma takođe imaju jednoliku strukturu. Međutim, nasuprot monokristalnim PV ćelijama, polikristalne PV ćelije imaju mnogo sitnih kristala, usled čega dolazi do pojave granica kristalnog zrna koje se suprotstavljaju kretanju elektrona, odnosno “primoravaju” ih na rekombinaciju sa šupljinama. Kao posledica navedenog procesa, polikristalne PV ćelije imaju nešto manju izlaznu snagu u odnosu na monokristalne PV ćelije. Dodatnu razliku u odnosu na monokristalne PV ćelije predstavlja sam oblik ćelije. Naime, polikristalne PV ćelije su četvrtastog oblika dok su monokristalne šestougaoonog oblika. Proces proizvodnje polikristalnih PV ćelija je znatno jeftiniji od procesa proizvodnje monokristalnih PV ćelija. Teorijska efikasnost im je oko 18%, dok se u realnim uslovima rada kreće između 10% i 13%.

Atomi unutar amorfni materijala nisu složeni u neku pravilnu strukturu, odnosno ne formiraju kristalnu strukturu. Takođe, amorfni materijali sadrže veliki broj strukturnih defekata, odnosno lošu povezanost, usled čega atomi nemaju susede sa kojim bi se povezali. Usled toga, elektroni se rekombinuju sa šupljinama. Defekti se mogu delimično ukloniti ako se u amorfni silicijum doda mala količina vodonika, što za posledicu ima kombinaciju atoma vodonika sa atomima amornog silicijuma koji nisu vezani, pa se elektroni mogu nesmetano kretati kroz materijal. Amorfni silicijum upija Sunčevo zračenje 40 puta efikasnije u odnosu na monokristalni silicijum. Teorijska efikasnost ovih PV ćelija je oko 11.5%, dok se u realnim uslovima rada kreće oko 7%.

Izlazni parametri PV ćelije su:

- Struja kratkog spoja I_{sc} ,
- Napon otvorenog kola U_{oc} ,
- Nominalna struja I_n ,
- Nominalni napon U_n ,
- Maksimalna snaga P_n ,
- Faktor ispune F i
- Efikasnost η .

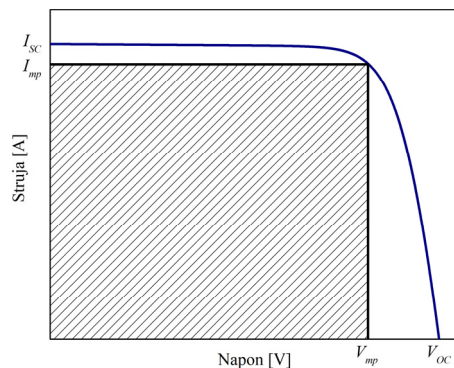
Tačka maksimalne snage predstavlja tačku na strujno-naponskoj karakteristici (engl. Current-Voltage I-V) PV ćelije u kojoj se nalazi teme pravougaonika najveće površine, koji se može nacrtati ispod I-V karakteristike PV ćelije. Primer određivanja tačke maksimalne snage prikazan je na slici 2.3.

Faktor ispune predstavlja odnos površine pravougaonika definisanog parametrima I_{sc} i V_{oc} i pravougaonika najveće površine koji služi za određivanje napona i struje maksimalne

snage, tj. V_{mp} i I_{mp} , kao što je prikazano na slici 2.3. Ovaj parametar karakteriše kvalitet poluprovodničkog spoja PV ćelije i definiše se kao:

$$F = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.1)$$

Na osnovu izraza (2.1) može se zaključiti da je vrednost faktora ispune uvek manja od 1. Za visoko kvalitetne PV ćelije vrednost ovog parametra se kreće oko 0.85, dok za većinu komercijalnih PV ćelija iznosi oko 0.68.



Slika 2.3 Definicija faktora ispune

Efikasnost PV ćelije, η , definiše se kao odnos maksimalne snage P_n i Sunčeve energije apsorbovane od strane PV ćelije P_L , a može se predstaviti izrazom:

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_L} \quad (2.2)$$

U tabeli 2.1. dati su tipični parametri nekih tipova PV ćelija, poput napona otvorenog kola V_{oc} , gustine struje kratkog spoja J_{sc} i efikasnosti η .

Tabela 2.1. Tipični parametri nekih PV ćelija

Vrsta ćelije	V_{oc} [V]	J_{sc} [mA/cm ²]	η
Monokristalna	0.65	30	0.17
Polikristalna	0.6	26	0.15
Amorfna	0.85	15	0.09
Cds/Cu ₂ S	0.5	20	0.1
CdS/CdTe	0.7	15	0.12
GaAlAs/GaAs	1	30	0.24
GaAs	1	20	0.27

Izlazni napon jedne PV ćelije je svega 0.6 V. S obzirom na činjenicu da je snaga jedne PV ćelije veoma mala, vrši se povezivanje više PV ćelija redno i paralelno u složeniju strukturu, koja se naziva PV modul. Za povećanje izlaznog napona PV modula vrši se redno povezivanje njegovih PV ćelija, a da bi se povećala struja, PV ćelije se vezuju paralelno. Imajući u vidu da je snaga jednaka proizvodu napona i struje, važno je pronaći optimalnu spregu redno-paralelnih veza ćelija u cilju dobijanja željenih vrednosti napona i struja na izlaznim priključcima modula. Izgled PV modula prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4 Izgled PV modula

PV ćelije, a samim tim i PV moduli, beleže sve veći i brži napredak u istraživanju materijala za njihovu izradu, pronalasku novih koncepata i procesa njihove proizvodnje.

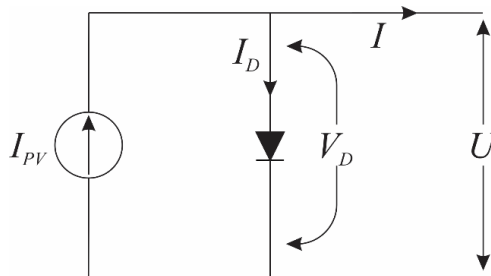
2.1 Matematički model PV ćelije

Matematičkim modelom PV ćelije omogućava se detaljno razumevanje njenog principa rada. Osim toga, pomoću matematičkog modela se mogu vršiti razne simulacije, kojima se može postići značajna ušteda u novcu i vremenu. Realizacija modela obuhvata detaljno poznavanje karakteristika materijala. U literaturi se najčešće sreću jednodiodni i dvodiodni modeli, mada postoje i trodiodni modeli PV ćelija [17].

2.1.1 Jednodiodni model PV ćelije

Idealni model PV ćelije može se predstaviti idealnim strujnim izvorom, paralelno vezanim sa ispravljačkom diodom, kao što je ilustrovano kolom prikazanim na slici 2.5. [18,

19, 20, 21]. Struja idealnog strujnog izvora direktno je proporcionalna intenzitetu Sunčevog zračenja.



Slika 2.5 Ekvivalentna šema PV ćelije

Jednodiodni model je najjednostavniji model PV ćelije koji se sreće u literaturi, a on u razmatranje ne uzima uticaj temperature. Dva radna režima koja su značajna za određivanje karakteristike PV ćelije su [22]:

- Struja kratkog spoja I_{SC} , kada je PV ćelija u kratkom spoju,
- Napon otvorenog kola V_{OC} , kada je kolo PV ćelije otvoreno.

Ukoliko se kontakti PV ćelije kratko spoje, struja neće proticati kroz diodu, pa će napon na njoj biti $V_D=0$, tj. struja će proticati kroz kratki spoj. U tom slučaju struja PV ćelije može se predstaviti sledećim izrazom:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_D \quad (2.3)$$

gde je I_D struja diode.

Struja diode može se predstaviti poznatim izrazom:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_D}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Na osnovu izraza (2.3) i (2.4) struja PV ćelije može se predstaviti sledećim izrazom:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_D}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

pri čemu su: q naelektrisanje elektrona, k je Boltzmann-ova konstanta, T je apsolutna temperatura diode, γ je faktor idealnosti diode, a I_0 je inverzna struja zasićenja diode koja se može predstaviti sledećim izrazom:

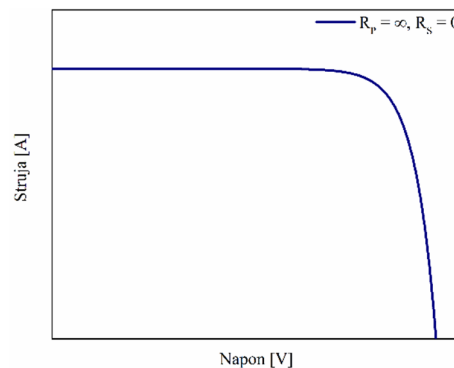
$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{\gamma \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.6)$$

gde je I_{0ref} struja zasićenja pri referentnim uslovima koju proizvođači obično ne navode u specifikacijama [21].

Ukoliko su kontakti PV ćelije otvoreni, sledi da je njena struja $I_{PV}=0$, što znači da se napon otvorenog kola može odrediti prema sledećem izrazu:

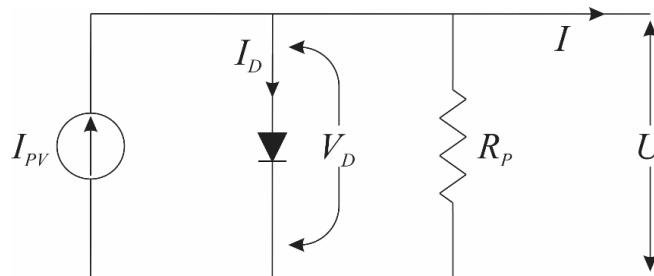
$$V_{OC} = \frac{\gamma \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.7)$$

Na osnovu vrednosti parametara V_{OC} i I_{SC} može se nacrtati I-V karakteristika PV ćelije kada je njena temperatura 25°C. Izgled jedne tipične I-V karakteristike prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6 I-V karakteristika tipične PV ćelije na temperaturi od 25°C

U slučaju zasenčenja PV ćelije neophodno je koristiti složeniju ekvivalentnu šemu, kod koje se u kolo dodaje otpornik R_P paralelno sa diodom, kao što je prikazano na slici 2.7.



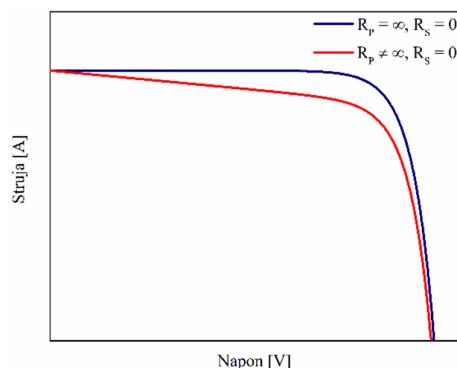
Slika 2.7 Ekvivalentna šema PV ćelije sa paralelnim otpornikom

Na osnovu ekvivalentne šeme sa slike 2.7 može se zaključiti da se struja idealnog strujnog izvora grana tako što protiče kroz diodu i otpornik R_P . Shodno tome, može se izvesti novi izraz sa struju PV ćelije:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_D - \frac{U}{R_P} \quad (2.8)$$

gde je U izlazni napon PV ćelije.

Paralelna otpornost R_P prouzrokuje smanjenje struje PV ćelije za vrednost U/R_P , što se može videti sa I-V karakteristike PV ćelije prikazane na slici 2.8.

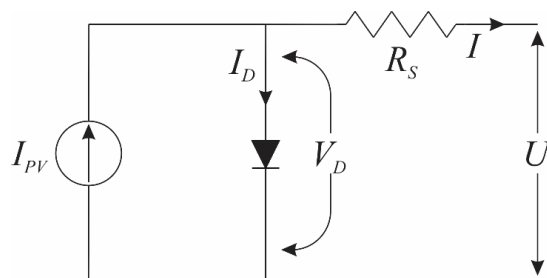


Slika 2.8 Uticaj paralelne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije

Kako bi pad struje PV ćelije, prouzrokovan paralelnom otpornošću R_P , bio manji od 1%, neophodno je da njena vrednost ispunjava sledeći uslov:

$$R_P > \frac{100 \cdot V_{OC}}{I_{SC}} \quad (2.9)$$

Ukoliko se u ekvivalentnu šemu doda redni otpornik R_S , koji predstavlja otpornost kontakata i vodova, dobija se ekvivalentna šema prikazana na slici 2.9.



Slika 2.9 Ekvivalentna šema PV ćelije sa rednim otpornikom

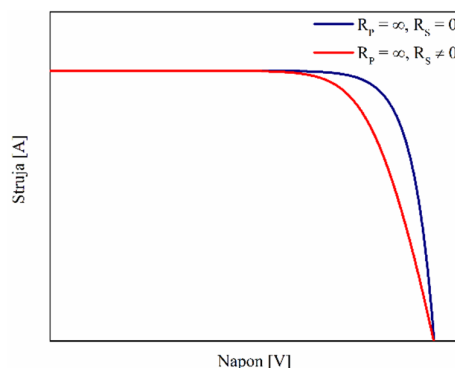
Na osnovu ekvivalentne šeme sa slike 2.9 napon na diodi može se dobiti iz sledećeg izraza:

$$V_D = U + I \cdot R_S \quad (2.10)$$

odakle sledi da je izraz za izračunavanje struje PV ćelije:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_S)}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

Na osnovu izraza (2.10) može se zaključiti da se napon PV ćelije smanjuje usled dodavanja redne otpornosti, što se može videti sa I-V karakteristike PV ćelije prikazane na slici 2.10.

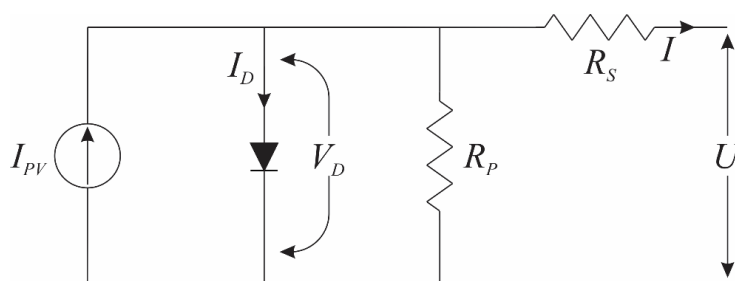


Slika 2.10 Uticaj redne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije

Uticaj redne otpornosti najbolje se ilustruje kroz faktor ispune, koji zapravo pokazuje koliki je uticaj ove otpornosti na efikasnost PV ćelije. Kako bi pad izlaznog napona PV ćelije prouzrokovan rednom otpornošću R_S bio manji od 1%, neophodno je da njena otpornost ispunjava sledeći uslov:

$$R_S < \frac{0.01 \cdot V_{OC}}{I_{SC}} \quad (2.12)$$

Najčešće korišćena ekvivalentna šema jednodiodnog modela PV ćelije uključuje i paralelnu i rednu otpornost, a njen izgled prikazan je na slici 2.11.

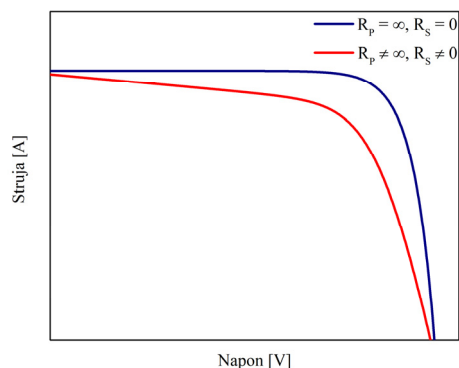


Slika 2.11 Najčešće korišćena ekvivalentna šema PV ćelije

Izraz za struju PV ćelije sa paralelnom i rednom otpornošću može se predstaviti kao:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_S)}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \left(\frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \right) \quad (2.13)$$

Uticaj obe otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije može se ilustrovati primerom prikazanim na slici 2.12.



Slika 2.12 Uticaj paralelne i redne otpornosti na I-V karakteristiku PV ćelije

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da je jednodiodni model PV ćelije opisan nelinearnom funkcijom u kojoj figuriše pet nepoznatih parametara i to:

- Fotostruja generisana insolacijom PV ćelije,
- Inverzna struja zasićenja,
- Faktor idealnosti,
- Redna otpornost,
- Paralelna otpornost.

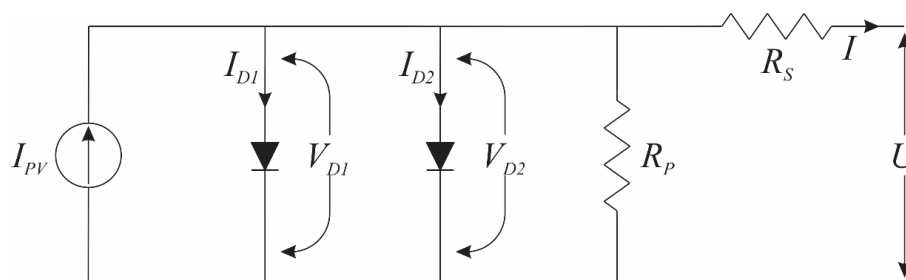
Fotostruja generisana insolacijom PV ćelije može se smatrati jednakom struji kratkog spoja, a za faktor idealnosti silicijumskih PV ćelija uglavnom se usvaja vrednost od 1.35.

Vrednosti redne i paralelne otpornosti neke PV ćelije mogu se odrediti ukoliko su poznate vrednosti struje kratkog spoja, inverzne struje zasićenja i faktora idealnosti diode.

Ekstrapolacija krive podrazumeva određivanje parametara modela tako da se I-V karakteristika poklapa se eksperimentalno dobijenom karakteristikom u tri tačke, i to sa strujom kratkog spoja, tačkom maksimalne snage i naponom otvorenog kola.

2.1.2 Dvodiodni model PV ćelije

Pored jednodiodnog modela PV ćelije, drugi najčešće korišćeni model je dvodiodni, koji je ujedno precizniji, ali za razliku od jednodiodnog modela ima više parametara, tačnije ima ih 7, usled čega je zahtevniji za analizu [21, 23, 24]. Naime, jednodiodni model polazi od pretpostavke da u zabranjenoj zoni nema rekombinacionih gubitaka, dok ih dvodiodni model uzima u obzir [25]. Ekvivalentna šema PV ćelije dvodiodnog modela prikazana je na slici 2.13.



Slika 2.13 Ekvivalentna šema PV ćelije dvodiodnog modela

Prema ekvivalentnoj šemi prikazanoj na slici 2.13 struja PV ćelije može se predstaviti sledećim izrazom:

$$I_{PV} = I_{SC} - I_{D1} - I_{D2} - \left(\frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \right) \quad (2.14)$$

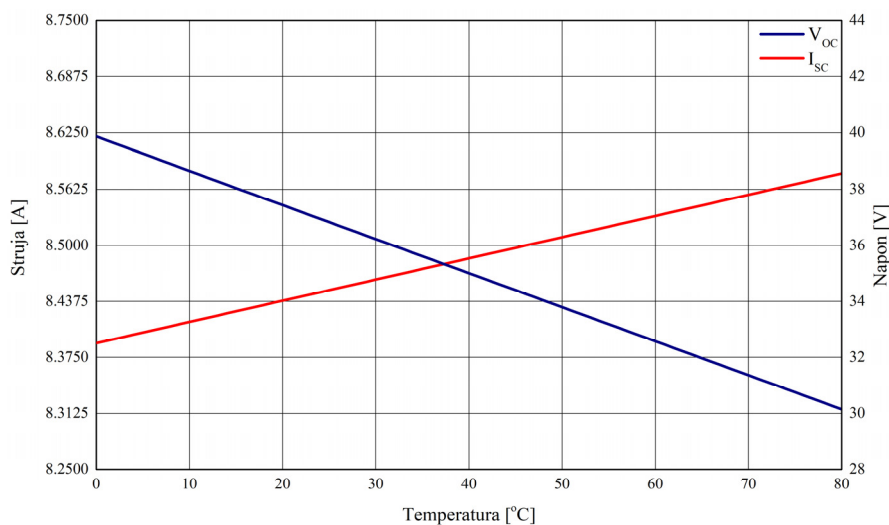
pri čemu su:

$$I_{D1} = I_{O1} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right), \quad I_{D2} = I_{O2} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.15)$$

Iako precizniji, dvodiodni model PV ćelije ređe se upotrebljava od jednodiodnog, jer ima više parametara, usled čega je komplikovaniji za analizu.

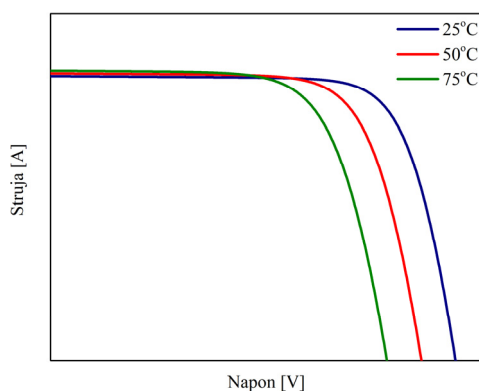
2.2 Modeli za proračun temperature PV modula

Proizvođači PV modula navode njihove električne karakteristike isključivo pri standardnim testnim uslovima (engl. Standard Test Conditions – STC) koji, između ostalog, propisuju da su PV ćelije osvetljene Sunčevom svetlošću jačine 1000 W/m^2 , dok je njihova temperatura 25°C . U realnim uslovima eksploatacije vrednosti ovih parametara bitno se razlikuju od normiranih vrednosti, tj. drastično variraju, što za posledicu ima promenu izlazne snage PV modula [26]. Naime, porastom temperature PV ćelija iznad 25°C , izlazna struja PV modula eksponencijalno raste, jer se potencijalna barijera sužava, a izlazni napon linearno opada, što se može videti na primeru komercijalnog monokristalnog PV modula MEPV 230 prikazanog na slici 2.14.



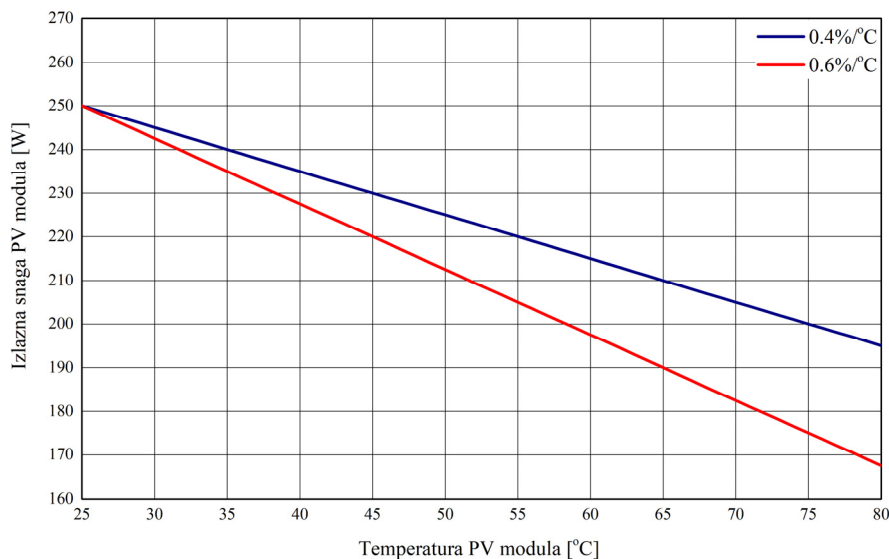
Slika 2.14 Promena napona i struje PV modula sa temperaturom

Koeficijent porasta struje kratkog spoja PV modula je $0.028\%/^\circ\text{C}$, dok je koeficijent pada napona otvorenog kola $-0.33\%/^\circ\text{C}$. Dakle, može se zaključiti da sa porastom temperature PV modula njegova izlazna snaga opada [27, 28, 29, 30, 31]. Koeficijent opadanja izlazne snage za silicijumske PV module obično se kreće do $-0.6\%/^\circ\text{C}$. Uticaj temperature na I-V karakteristiku neke PV ćelije ilustrovan je primerom prikazanim na slici 2.15.



Slika 2.15 Uticaj temperature na I-V karakteristiku PV ćelije

Smanjenje izlazne snage PV modula od 250 W sa koeficijentima pada izlazne snage od $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ i $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ ilustrirano je primerom prikazanim na slici 2.16.



Slika 2.16 Smanjenje izlazne snage PV modula od 250 W sa temperaturom

Dakle, temperatura PV modula je veoma bitan parametar koji u velikoj meri utiče na njegovu efikasnost. Kao što se može videti iz primera prikazanog na slici 2.16, porast temperature PV modula iznad 25°C uzrokuje značajan pad njegove izlazne snage. Primera radi, ako je temperatura PV ćelija 65°C , njegova efikasnost je oko 20% manja od deklarisanе vrednosti pri STC uslovima. Zapravo, rezultati pojedinih istraživanja pokazuju da je efikasnost PV modula veća u proleće i jesen, nego tokom leta za određene uglove inklinacije PV modula [32, 33].

Imajući u vidu činjenicu da realni uslovi rada u većoj meri odstupaju od STC uslova, sasvim je očekivano da se efikasnost PV modula, kao i ostali tehnički parametri, u izvesnoj meri razlikuju od specificiranih vrednosti kada je PV modul izložen realnim eksploatacionim uslovima rada.

Vrednost temperature PV modula može se dobiti neposrednim merenjem pomoću mernog instrumenta ili se može proračunati primenom matematičkog modela na osnovu meteoroloških parametara koji vladaju u okolini PV modula [34, 35]. Za proračun temperature PV modula postoji više matematičkih modela od kojih svaki ima svoju grešku aproksimacije. U daljem tekstu analizirani su neki od modela koji se koriste za proračun temperature PV ćelija nekog PV modula.

2.2.1 Ross-ov model za proračun temperature PV modula

Jedan od prvih realizovanih modela za proračun temperature PV modula [36] polazi od pretpostavke da je razlika između ambijentalne temperature i temperature PV modula direktno proporcionalna intenzitetu upadne Sunčeve svetlosti. Navedeni odnos se može predstaviti sledećim izrazom:

$$T_m = T_a + k_R \cdot E \quad (2.16)$$

gde je T_m temperatura PV modula, T_a je ambijentalna temperatura, E je intenzitet Sunčevog zračenja, a k_R je Ross-ov koeficijent koji zavisi od tehnologije izrade PV modula, njegove veličine i oblika, načina montaže, kao i od određenih ambijentalnih uslova.

Ovaj model odlikuje velika jednostavnost, ali ujedno i nepreciznost, jer u proračun uzima samo jedan ambijentalni parametar, odnosno ambijentalnu temperaturu.

2.2.2 Sandia model za proračun temperature PV modula

Ross-ov model u proračun ne uzima vetar kao bitan parametar, iako on to zapravo jeste, jer može značajno promeniti temperaturu PV modula. Prvi model za proračun temperature PV modula razvijen od strane Sandia National Laboratories [37] odlikuje prevelika kompleksnost i nemogućnost primene na sve tehnologije izrade PV modula, što je značajno umanjilo njegovu praktičnu primenu.

Uvažavajući navedene nedostatke, istraživači ove laboratorije razvili su jednostavniji model [38] koji se uspešno primenjuje na ravne module pri različitim tipovima montaže. Predloženi model predviđa temperaturu PV modula sa tačnošću oko $\pm 5^{\circ}\text{C}$ i može se predstaviti sledećim izrazom:

$$T_m = E \cdot (e^{a+b \cdot W_s}) + T_a \quad (2.17)$$

gde je W_s brzina vetra data u [m/s], a a i b su koeficijenti dobijeni eksperimentalnim putem, koji zavise od konstrukcije PV modula, materijala od kog je izrađen, kao i od načina montaže.

Vrednosti koeficijenata a i b , u zavisnosti od tipa modula i načina montaže, predstavljeni su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Vrednosti koeficijenata a i b za Sandia model

Tip modula	Način montaže	a	b	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Staklo/ćelija/staklo	Otvorena	-3.47	-0.594	3
Staklo/ćelija/staklo	Postavljeno na krov	-2.98	-0.0471	1
Staklo/ćelija/polimer	Otvorena	-3.56	-0.075	3
Staklo/ćelija/polimer	Izolovana poledina	-2.81	-0.0455	0
Polimer/tanki film/čelik	Otvorena	-3.58	-0.113	3
22X linearni koncentrador	Traker	-3.23	-0.130	13

Osnovni nedostatak ovog modela je što su sve vrednosti koeficijenata proračunate za lokaciju u Novom Meksiku, što znatno ograničava njegovu primenu na drugim geografskim područjima [39].

2.2.3 Servant-ov temperaturni model PV modula

Servant-ov temperaturni model je baziran na pojednostavljenom modelu prenosa toplote između PV modula i okoline u kojoj su smešteni [40]. Navedeni model može se predstaviti sledećim izrazom:

$$T_m = T_a + d \cdot E \cdot (1 + e \cdot T_a) \cdot (1 - f \cdot W_s) \quad (2.18)$$

gde su d , e i f odgovarajući empirijski koeficijenti dobijeni eksperimentalnim putem.

2.2.4 David Faiman-ov model za proračun temperature PV modula

David Faiman-ov model je dobijen na osnovu balansa energije za PV modul [41] i može biti predstavljen sledećim izrazom:

$$T_m = T_a + \frac{E}{U_0 + U_1 \cdot W_S} \quad (2.19)$$

gde je U_0 koeficijent koji opisuje efekat iradijacije na temperaturu PV modula, a U_1 koeficijent koji opisuje efekat hlađenja vetrom.

Koeficijenti U_0 i U_1 dobijeni su eksperimentalnim putem, pri čemu se vrednost koeficijenta U_0 kreće u opsegu od 23.5 do 26.5, dok se vrednost koeficijenta U_1 kreće u opsegu od 6.25 do 7.68.

Iz izraza (2.19) može se dobiti realna radna temperatura modula (engl. Realistic Operating Module Temperature – ROMT), koja se može predstaviti sledećim izrazom [42]:

$$ROMT = 20 + \frac{800}{U_0 + U_1 \cdot W_S} \quad (2.20)$$

U testiranjima vršenim u Izraelu u pustinji Negev, prosečna vrednost proračunate ROMT temperature iznosila je 43.7°C, dok je njena stvarna vrednost bila 45.5°C. Eksperimentalnim putem pokazano je da je izraz (2.20) veoma dobar za predviđanje temperature PV modula, čak i nakon samo jednog meseca eksperimentalnih merenja u pustinji. Sa druge strane, u slučaju planinske klime neophodan je duži merni period za dobijanje uporedivih rezultata [42].

2.2.5 NOCT model za proračun temperature PV modula

Proizvođači PV modula obično definišu temperaturu pri normalnim uslovima eksploatacije (engl. Nominal Operating Cell Temperature – NOCT) [43], koja zapravo predstavlja temperaturu njihovih PV ćelija pri ambijentalnoj temperaturi od 20°C, solarnoj iradijaciji od 800 W/m² i brzini vetra od 1 m/s.

Temperatura fotonaponske ćelije pri različitoj iradijaciji i ambijentalnoj temperaturi može se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$T_C = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot E \quad (2.21)$$

gde je T_c temperatura PV ćelije.

Ukoliko za neki PV modul nije dostupan parametar NOCT, temperatura njegovih PV ćelija može se odrediti primenom sledećeg izraza:

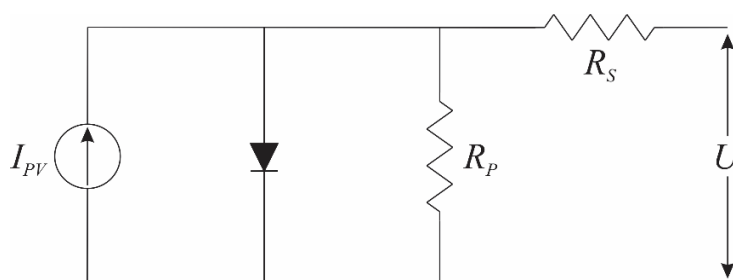
$$T_c = T_a + \gamma \cdot \frac{E}{1000} \quad (2.22)$$

gde je γ koeficijent proporcionalnosti koji zavisi od uslova hlađenja.

Tipična vrednost koeficijenta proporcionalnosti γ je između 25°C i 35°C, što znači da će pri iradijaciji od 1000 W/m² temperatura PV ćelija, nekog PV modula, biti veća od temperature ambijenta za 25°C do 35°C.

2.3 Realizacija jednodiodnog modela PV ćelije

Kako bi se smanjila upotreba temperaturnih senzora, u procesu merenja temperature PV modula može se vršiti njena procena odgovarajućim matematičkim modelom. Prvi korak u razvoju sopstvenog modela za procenu temperature PV modula obuhvata realizaciju matematičkog modela PV ćelije, odnosno PV modula. U tu svrhu pristupilo se realizaciji najčešće korišćenog jednodiodnog modela PV ćelije u softverskom paketu Matlab, koji će služiti kao osnova u razvoju modela za predviđanje temperature PV modula. Šema realizovanog modela PV ćelije prikazana je na slici 2.17.



Slika 2.17 Šema jednodiodnog modela PV ćelije

Na osnovu električne šeme prikazane na slici 2.17 realizovan je jednodiodni model PV modula u programskom paketu Matlab i to u formi koda.

```
% PV model
clc;
clear all;
K = 1.38065e-23; %Boltzman
q = 1.602e-19;  %naelektrisanje
Isc = 8.3;      %Struja kratkog spoja
```

```

Voc = 36.3;           %Napon otvorenog kola
Kv = -0.123;         %Temperaturna konstanta napona
Ki = 0.0032;        %Temperaturna konstanta struje
Ns = 60;            %Broj celija u modulu
T = 25+273.15;      %Temperatura modula
Tn = 25+273.15;     %Nominalna temperatura
Gn = 1000;          %Nominalna iradijacija
a = 1.3;            %Konstanta idealnosti diode
Eg = 1.12;          %Band gap silicijuma
G = 1000;           %Iradijacija
Rs = 0.5;
Rp = 600.405;
Vtn = Ns*(K*Tn/q);
Ion = Isc/( (exp(Voc/(a*Vtn)))-1);
Io = Ion*((T/Tn)^3)*exp(((q*Eg/(a*K))*(1/Tn)-(1/T)));
Ipvn = Isc;
Ipv = (Ipvn + Ki*(T-Tn))*(G/Gn);
Vt = Ns*(K*T/q);
I = zeros(330,1);
i = 1;
I(1,1)=0;
for V=0:0.1:36.3

    I_part = Io*(exp((V+(I(i,1)*Rs))/(Vt*a))-1)+((V+(Rs*I(i,1)))/Rp);

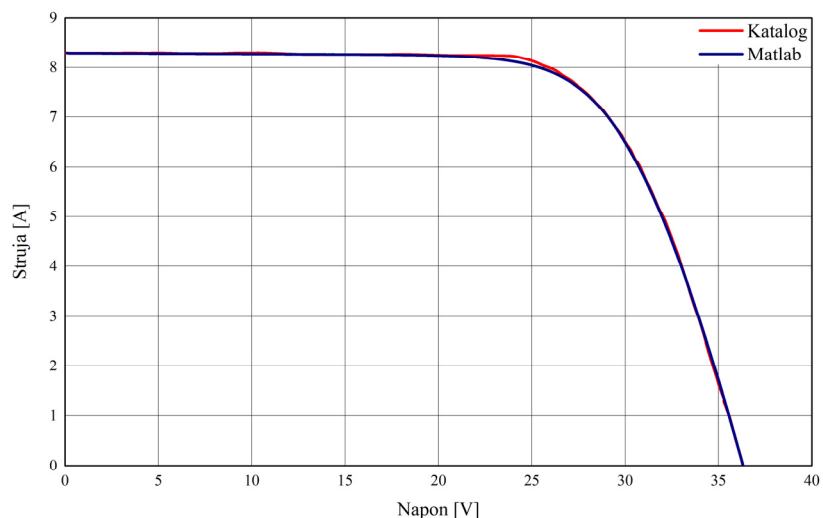
    I(i+1) = Ipv - I_part;

    V1(i) = V;
    P(i) = V*I(i);
    i = i+1;
end
V1(i) = V1(i-1);
P(i) = P(i-1);
V1 = transpose(V1);
% subplot (3,1,1)
% plot(V1,I);
% subplot (3,1,2)
plot(V1,P);
P = transpose(P);
% subplot(3,1,3)
% plot(V1,I_part);

```

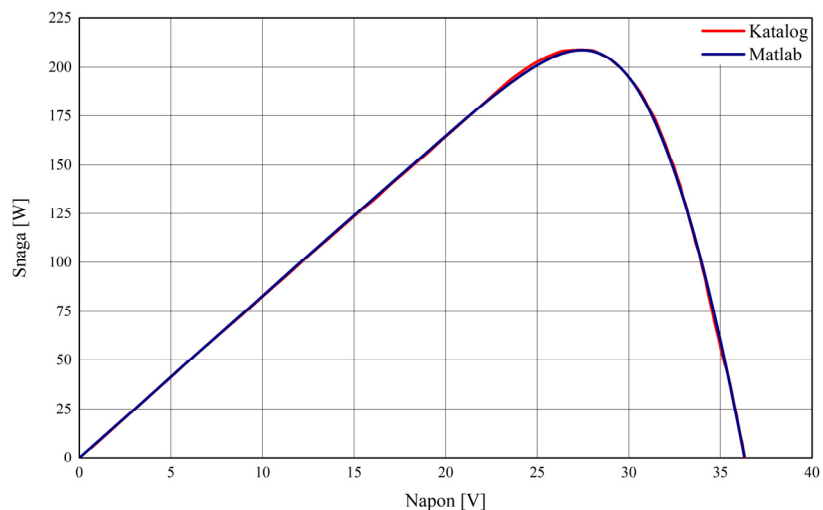
U nedostatku odgovarajuće merne opreme, validacija realizovanog modela izvršena je na primeru monokristalnog PV modula MEPV230, čije su karakteristike dostupne iz kataloga proizvođača, a koji predstavlja deo realizovane PV elektrane snage 5.5 kW na kojoj je planirano testiranje budućeg modela za procenu temperature PV modula. Na slici 2.18 prikazani su rezultati dobijeni realizovanim jednodiodnim modelom i njihovo poređenje sa I-V krivom prikazanom u karakteristikama proizvođača.

Fitovanje I-V karakteristika predloženog modela moguće je promenom otpornosti R_p i R_s u samom modelu. Sa slike 2.18 može se uočiti veoma dobro poklapanje između I-V karakteristike preuzete iz kataloga proizvođača i karakteristike dobijene pomoću Matlab modela.



Slika 2.18 Poređenje modelirane i kataloške I-V karakteristike modula [44]

Drugi deo validacije odnosi se na poređenje između karakteristika snage PV modula dobijene realizovanim jednodiodnim modelom i karakteristike snage prikazane u katalogu proizvođača. Rezultati ovog poređenja prikazani su na slici 2.19.



Slika 2.19 Poređenje modelirane i kataloške karakteristike snage PV modula [44]

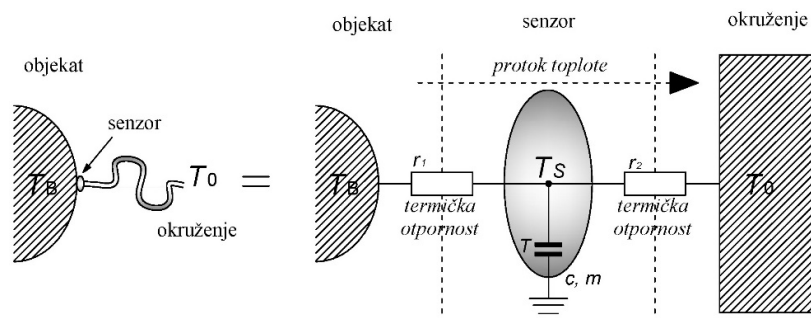
Rezultati uporedne analize identični su kao i u slučaju I-V karakteristika, na osnovu čega se može zaključiti da realizovani model ima zadovoljavajuću tačnost.

3. SENZORI ZA MERENJE TEMPERATURE PV MODULA

U osnovi, senzor predstavlja merni pretvarač koji vrši konverziju određene fizičke veličine u električni signal, pri čemu predstavlja jednu od osnovnih komponenti svakog mernog instrumenta, odnosno mernog sistema [45, 46, 47]. Uspešno merenje temperature kontaktnim temperaturnim senzorom podrazumeva da između njega i tela čija se temperatura meri nema termalnog gradijenta, tj. da među njima postoji termalni ekvilibrijum.

Ukoliko kontaktni temperaturni senzor nije u fizičkom kontaktu isključivo sa telom čiju temperaturu meri, već i sa nekim drugim telom, ili čak ambijentom, njegova merenja neće biti u potpunosti tačna. Mernu grešku mogu uneti čak i provodnici kojima je temperaturni senzor povezan na merni sistem.

Prilikom merenja temperature nekog tela T_B , kontaktni temperaturni senzor ima neku svoju temperaturu T_S . Cilj merenja je da T_S bude jednaka T_B , odnosno da bude što je moguće njoj približnija. Jednim svojim krajem kabl je priključen na kontaktni temperaturni senzor, dok je ostatak kabla izložen ambijentalnoj temperaturi T_0 koja se može bitno razlikovati od temperature tela T_B , usled čega kabl prenosi deo toplote sa temperaturnog senzora ili na njega u zavisnosti od toga koja od ove dve temperature je veća. Na slici 3.1 prikazano je termičko ekvivalentno kolo koje uključuje telo, kontaktni temperaturni senzor, ambijent i termičke otpornosti r_1 i r_2 koje predstavljaju sposobnost nekog tela da provodi toplotu.



Slika 3.1 Prenos toplote sa tela na senzor

Termička energija koja se prenese sa tela na kontaktni temperaturni senzor jednaka je energiji koju temperaturni senzor preda okolini, što se može izraziti sledećom relacijom:

$$\frac{T_B - T_S}{r_1} = \frac{T_B - T_0}{r_1 + r_2} \quad (3.1)$$

Na osnovu prethodne relacije sledi da je temperatura senzora jednaka:

$$T_S = T_B - (T_B - T_0) \cdot \frac{r_1}{r_2} = T_B - \Delta T \cdot \frac{r_1}{r_2} \quad (3.2)$$

gde je ΔT termalni gradijent između tela i ambijenta.

Iz relacije (3.2) vidi se da je temperatura kontaktnog temperaturnog senzora T_S uvek različita od temperature tela T_B . Jedini izuzetak predstavlja stanje kada su temperature tela i ambijenta jednake, tj. kada je $\Delta T = T_B - T_0 = 0$. Osim toga, nezavisno od termalnog gradijenta ΔT , temperatura T_S će biti jednaka temperaturi T_B kada je $r_1/r_2 = 0$. Da bi ovo bilo moguće neophodno je maksimalno povećati toplotnu provodnost između kontaktnog temperaturnog senzora i tela čija se temperatura meri, dok istovremeno treba u potpunosti eliminisati toplotnu provodnost između kontaktnog temperaturnog senzora i ambijenta.

U dinamičkim uslovima, kada se menjaju ambijentalna temperatura, temperatura tela ili kada je kontaktni temperaturni senzor tek prislonjen na telo, dolazi do prenosa toplote koji je proporcionalan termalnom gradijentu između temperature kontaktnog temperaturnog senzora T_S i temperature tela T_B prema sledećem izrazu:

$$dQ = \alpha_1 \cdot (T_B - T_S) \cdot dt \quad (3.3)$$

gde je $\alpha_1 = l/r_1$ termalna provodnost između kontaktnog temperaturnog senzora i tela čija se temperatura meri.

Ukoliko se specifična toplota senzora predstavi sa c , a masa sa m , apsorbovana toplota kontaktnog temperaturnog senzora je jednaka:

$$dQ = m \cdot c \cdot dT \quad (3.4)$$

Pod pretpostavkom da je termička izolacija kontaktnog temperaturnog senzora dobra, može se zanemariti gubitak toplote sa temperaturnog senzora na okruženje, tj. $r_2 = \infty$, pa sledi da je:

$$\alpha_1 \cdot (T_1 - T) \cdot dT = m \cdot c \cdot dT \quad (3.5)$$

pri čemu se termalna vremenska konstanta može definisati kao:

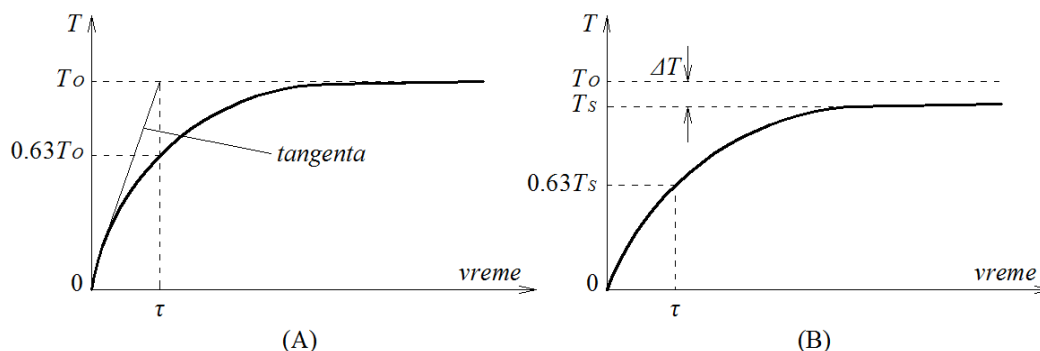
$$\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha_1} = m \cdot c \cdot r_1 \quad (3.6)$$

$$\frac{dT}{T_1 - T} = \frac{dT}{\tau} \quad (3.7)$$

odakle sledi da je:

$$T_S = T_B - \Delta T e^{-t/\tau} \quad (3.8)$$

Promena temperature kontaktnog temperaturnog senzora u funkciji vremena prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2 Promena temperature kontaktnog temperaturnog senzora:

a) koji je izolovan; b) koji nije izolovan

Konstanta τ jednaka je vremenu koje protekne dok temperatura senzora T_S ne dostigne 63.2% konačne vrednosti u ustaljenom stanju. Što je ova konstanta manja, to je odziv kontaktnog temperaturnog senzora na promene temperature brži. Može se smatrati da je nakon 5τ razlika samo 0.7% od inicijalnog termalnog gradijenta, a nakon 10τ svega 0.005%.

Ukoliko kontaktni temperaturni senzor nije termički izolovan, tj. ako je $r_2 \neq \infty$, termalna vremenska konstanta dobija se iz izraza:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha_1 + \alpha_2} = m \cdot c \cdot \frac{r_1}{1 + \frac{r_1}{r_2}} \quad (3.9)$$

Na osnovu slike 3.2 može se zaključiti da termički neizolovan kontaktni temperaturni senzor zapravo nikad neće dostići temperaturu tela, što znači da njegovo merenje iste nikad

neće biti tačno. U ovom slučaju, razlika između stvarne temperature tela i temperature koju meri kontaktni temperaturni senzor direktno zavisi od razlike između ambijentalne temperature i stvarne temperature tela.

Kontaktni temperaturni senzor sastoji se od sledećih elemenata:

- Senzorski element – materijal čija se određena karakteristika menja sa promenom temperature. Potrebno je da poseduje malu specifičnu toplotu, malu masu, veliku termalnu provodljivost i veliku, ujedno i poznatu, osetljivost na promenu temperature.
- Kontakti između senzorskog elementa i spoljašnjeg električnog kola. Potrebno je da poseduju malu termalnu provodljivost i zanemarljivu električnu otpornost.
- Zaštitno kućište koje štiti senzor od okolnih uticaja. Neophodno je da kućište poseduje dobru termalnu provodljivost i da je u električnom pogledu dobar izolator.

3.1 Otporni temperaturni senzori

Opšte je poznato da se otporni temperaturni senzori (engl. Resistance Temperature Detectors – RTD) mogu napraviti od pojedinih metala tako da sa porastom temperature, kojoj su izloženi, raste njihova otpornost i obratno. Za izradu ovih senzora mogu se koristiti jeftiniji metali poput bakra i nikla, ali je u tom slučaju merni opseg senzora u velikoj meri smanjen zbog nelinearne prenosne karakteristike. Zbog toga, RTD temperaturni senzori se najčešće izrađuju od platine, jer platina ima dugotrajnu stabilnost u širokom temperaturnom opsegu, ima dobru linearnost, dobru ponovljivost merenja i ima najširi temperaturni opseg primene od svih metala. Za merenje temperature u opsegu iznad 600°C, RTD temperaturni senzori obično se izrađuju od volframa. Za njihovu izradu koriste se dve tehnologije:

- Senzori realizovani kao tanki film koji se nanosi na keramiku;
- Senzori u vidu namotaja žice u obliku kalema.

Otpornost ovih temperaturnih senzora može se izračunati aproksimativno iz Callendar–Van Dusen-ove jednačine [48] i to za temperature u opsegu od –200°C do 0°C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot T_S + B \cdot T_S^2 + C \cdot T_S^3 \cdot (T_S - 100)] \quad (3.10)$$

i za temperature od 0°C do 630°C:

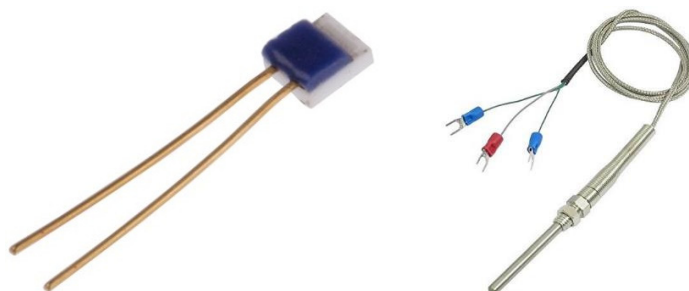
$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot T_S + B \cdot T_S^2] \quad (3.11)$$

pri čemu je R_0 otpornost temperaturnog senzora Pt100 na 0°C , koja iznosi $100\ \Omega$, A je koeficijent koji iznosi $3.9083 \times 10^{-3}\ \text{°C}^{-1}$, B je koeficijent koji iznosi $-5.775 \times 10^{-7}\ \text{°C}^{-2}$ i C je koeficijent koji iznosi $-4.183 \times 10^{-12}\ \text{°C}^{-4}$, dok je temperatura senzora T_S data u $[\text{°C}]$.

Merenje temperature pomoću RTD temperaturnih senzora obično se sprovodi tako što se kroz njih propušta struja poznatog, konstantnog intenziteta, nakon čega se meri pad napona na senzoru. Na osnovu ove dve vrednosti može se dobiti otpornost RTD temperaturnog senzora, a iz izraza (3.10) i (3.11) potom se može izračunati vrednost temperature na osnovu otpornosti RTD senzora.

Kako bi se izbegli Džulovi gubici, tj. smanjilo samozagrevanje senzora, neophodno je da njegova pobudna struja bude u određenom opsegu. Npr. Pt100 temperaturni senzor obično se pobuđuje strujom intenziteta od 0.8 mA do 1 mA.

RTD temperaturni senzori u obliku tankog filma dobijaju se naparavanjem metala na keramičku podlogu. S obzirom na to da ovaj tip RTD temperaturnog senzora ima veliki odnos između površine i zapremine, dobija se brz odziv pri merenju temperature nekog tela. Rezolucija merenja temperature je $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Na slici 3.3 prikazan je izgled tipičnih RTD temperaturnih senzora.



Slika 3.3 Izgled RTD temperaturnih senzora u obliku tankog filma i kalema

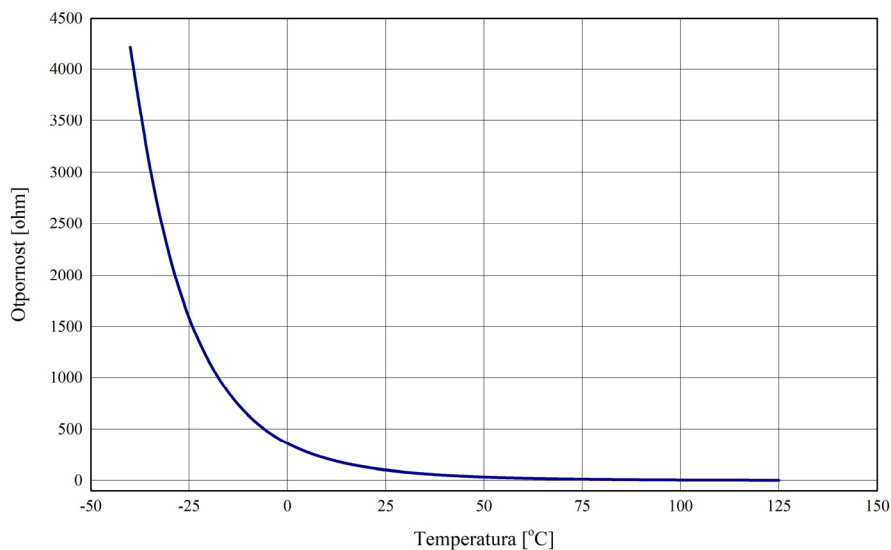
RTD temperaturni senzori, a naročito Pt100 temperaturni senzori, predstavljaju najčešći izbor za merenje temperature PV modula prevashodno zbog velike tačnosti merenja i odlične linearnosti. Međutim, visoka cena akvizicionih sistema baziranih na Pt100 temperaturnim sensorima u velikoj meri umanjuje njihovu primenu, pa se iz navedenog razloga u aplikacijama u kojima troškovi moraju biti minimalni Pt100 temperaturni senzori gotovo uopšte ne koriste.

3.2 Termistori

Reč termistor (engl. Thermistor) je nastala spajanjem reči termo (engl. Thermal) i otpornik (engl. Resistor), što znači da je termistor zapravo otpornik osetljiv na temperaturne promene. Za razliku od RTD temperaturnih senzora, termistori se prave od poluprovodničkih keramika i u zavisnosti od materijala od koga se prave mogu imati pozitivni temperaturni koeficijent otpornosti (engl. Positive Temperature Coefficient – PTC) ili negativni temperaturni koeficijent otpornosti (engl. Negative Temperature Coefficient – NTC). Pored toga, promena otpornosti kod termistora je znatno izraženija u odnosu na RTD temperaturne senzore.

Proces merenja temperature termistorima sličan je procesu merenja sa RTD temperaturnim sensorima, što znači da se kroz termistor propušta konstantna struja određenog intenziteta. Na osnovu izmerenog napona na termistoru i poznate struje koja protiče kroz njega može se odrediti otpornost termistora, iz koje se dobija vrednost temperature koja se meri.

Za precizno merenje temperature koriste se isključivo NTC termistori zato što imaju veliku osetljivost na promene temperature i visoku tačnost merenja iste, imaju veliku imunost na električni šum, a uz sve to imaju širok radni opseg koji može da se kreće od -80°C do 300°C [49]. Međutim, sve prednosti NTC termistora nad ostalim temperaturnim sensorima obično budu u drugom planu zbog njihove veoma izražene nelinearne prenosne karakteristike prikazane na slici 3.4.



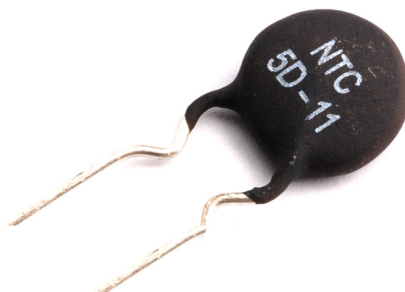
Slika 3.4 Prenosna karakteristika NTC termistora

Kao što se može videti sa slike 3.4, otpornost NTC termistora opada sa porastom temperature prema sledećem izrazu:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3.12)$$

gde je R_T otpornost na temperaturi T , R_0 je otpornost na referentnoj temperaturi T_0 koja obično iznosi 20°C , a β je koeficijent koji zavisi od vrste materijala. Što je vrednost ovog koeficijenta veća, veći je odnos između otpornosti i temperature, i samim tim osetljivost NTC termistora je veća.

Tipična vrednost otpornosti R_0 je između $1\text{ k}\Omega$ i $10\text{ k}\Omega$, a koeficijenta β između 1500 K i 6000 K (najčešće 4000 K), što znači da se vrednost temperature dobijene pomoću izraza (3.12) predstavlja u Kelvinima. Vrednosti ovih parametara daju se sa tačnošću od $\pm 20\%$, odnosno $\pm 17\%$. Tačne vrednosti parametara R_0 i β mogu se odrediti metodom parametarskog merenja, odnosno testiranjem termistora na dvema poznatim temperaturama, usled čega je neophodno izvršiti individualnu kalibraciju NTC termistora, a kvalitet i tačnost iste zavise od broja kalibracionih tačaka i preciznosti referentnog instrumenta. Kao i u slučaju RTD temperaturnih senzora, mora se voditi računa o intenzitetu pobudne struje da ne bi došlo do samozagrevanja NTC termistora. Izgled tipičnog NTC termistora prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5 Izgled tipičnog termistora

Nedovoljna linearnost termistora i potreba za korišćenjem referentnog instrumenta značajno umanjuju njihovu upotrebu u merenju temperature PV modula. Još jedan od nedostataka je i izražena razlika između karakteristika termistora istog tipa, usled čega je zamena jednog termistora drugim uslovljena njegovom prethodnom kalibracijom. Međutim, i pored navedenih nedostataka, termistori imaju određenu primenu u merenjima temperature PV modula prevashodno zahvaljujući velikoj osetljivosti na promene temperature.

3.3 Termoparovi

Termopar predstavlja spoj dva metala od različitih materijala, pri čemu je tačka spoja, tj. topli kraj, u kontaktu sa objektom čija se temperatura određuje. Termoparovi su pasivni temperaturni senzori, što znači da na svom izlazu generišu napon proporcionalan merenoj temperaturi i pri tome ne zahtevaju nikakav pobudni signal. Prilikom merenja temperature termoparom neophodno je poznavanje ili merenje temperature na jednom spoju, tj. u hladnoj tački. Za ovu svrhu obično se koristi dodatni temperaturni senzor, što znači da tačnost merenja temperature termoparom zapravo zavisi od dva temperaturna senzora.

Termoparovi se mogu izraditi od bilo koja dva čista metala ili legure. Međutim, zato što se od materijala zahtevaju određena termoelektrična i mehanička svojstva, broj kombinacija je ograničen. Podela termoparova izvršena je na osnovu materijala od kog su izrađeni na:

- Tip T,
- Tip J,
- Tip E,
- Tip K,
- Tipove R i S,
- Tip B.

Da bi se povećala osetljivost termopara i pojačao izlazni napon, može se izvršiti redno povezivanje nekoliko termoparova, pri čemu se njihovi topli krajevi priključuju na telo čija se temperatura meri, a hladni krajevi se dovode na referentnu (poznatu) temperaturu. Opisana konfiguracija naziva se termopajl (engl. Thermopile).

Ceo termopar sastoji se od:

- Žica koje formiraju spoj u jednoj tački,
- Zaštitnog omotača,
- Kućišta i
- Kontakta (najčešće u obliku zavrtnja na koji se povezuju produžni kablovi).

Žice termopara neophodno je električno izolovati kako bi se eliminisala mogućnost generisanja merne greške. Da bi se sprečio uticaj vlage, zaštitni omotač mora biti neosetljiv na vlagu, i realizovan npr. od teflona ili PVC-a. Izgled tipičnog savitljivog termopara prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6 Izgled tipičnog savitljivog termopara

Iako su termoparovi veoma korišćeni u industriji, i imaju pristupačne cene, njihova upotreba u merenju temperature PV modula je ograničena usled nedovoljne preciznosti, kao i problema sa električnim povezivanjem i montiranjem na PV modul.

3.4 Poluprovodnički temperaturni senzori

Ukoliko se dioda polarizuje konstantnim naponom V_D , struja diode I_D zavisiće od vrednosti temperature prema izrazu (2.4). Intenzitet struje I_D je veoma mali, pa se umesto nje vrši merenje napona V_D koji se pri konstantnoj struji I_D menja sa temperaturom. Međutim, ova promena nije u potpunosti linearna, ali se u opsegu od -50°C do 150°C može smatrati približno linearnom i predstaviti sledećim izrazom:

$$V_D \approx k_1 - k_2 \cdot T \quad (3.13)$$

gde je $k_1=1.27$ V kada je napon $V_D=0$ V, a konstanta osetljivosti k_2 je $2-3$ mV/K zavisno od jačine struje I_D .

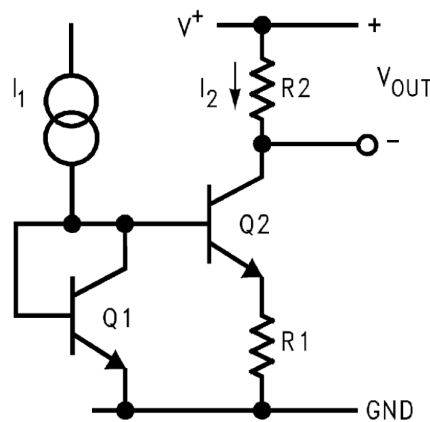
Sa klasičnim višenamenskim silicijumskim diodama poput 1N914 i 1N4148 postiže se tačnost merenja do $\pm 2^{\circ}\text{C}$, a sa namenskim diodnim sensorima od $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ do 1°C .

Na isti način mogu se meriti temperature primenom tranzistora, s tim što se menja napon V_{BE} pri konstantnoj struji kolektora I_C . Promena napona V_{BE} sa temperaturom je, kao i u slučaju diode, približno linearna u opsegu od -50°C do 150°C i takođe se može predstaviti izrazom (3.13), pri čemu vrednost koeficijenta k_1 ima istu vrednost, dok je vrednost koeficijenta $k_2=2.3$ mV/ $^{\circ}\text{C}$. Međutim, dioda kao temperaturni senzor je jednostavnija u odnosu na tranzistor jer su joj gubici manji, a odziv brži.

Razlike između karakteristika tranzistora nastale usled nesavršenosti procesa izrade i nestabilnost napona V_{BE} sa promenom temperature mogu se u velikoj meri, ili čak u potpunosti, eliminisati povezivanjem dva tranzistora prema šemi prikazanoj na slici 3.7. U ovom kolu meri se razlika napona V_{BE} dva tranzistora koja je proporcionalna apsolutnoj temperaturi shodno izrazu (3.14). Shodno tome, ovakav tip senzora najčešće se naziva proporcionalnim apsolutnoj temperaturi (engl. Proportional to the Absolute Temperature – PTAT) [50].

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \quad (3.14)$$

Sve dok je odnos struja kolektora konstantan, razlika ΔV_{BE} proporcionalna je apsolutnoj temperaturi i nezavisna od napona napajanja i karakteristika tranzistora. Na slici 3.7 razlika ΔV_{BE} meri se na otporniku R_1 .



Slika 3.7 Kolo PTAT temperaturnog senzora

Veliku prednost PTAT temperaturnih senzora predstavlja mogućnost implementacije u integrisanim kolima uz minimalne troškove. Dodatnu prednost pruža mogućnost izrade analognog ili digitalnog integrisanog temperaturnog senzora sa ugrađenim pojačavačima i kolima za odabir temperaturnog opsega.

Digitalni integrisani temperaturni senzori sadrže ADC konvertor i dodatna digitalna kola kojima se podržavaju različiti tipovi komunikacija sa mikrokontrolerom. Najčešće podržani tipovi komunikacija su I²C, SMBus, SPI i 1-Wire.

Na slici 3.8 prikazan je izgled jednog od najčešće korišćenih poluprovodničkih analognih temperaturnih senzora, koji ima oznaku LM35 i izrađuje se u TO-92 tranzistorskom kućištu.

Deo upadnih talasa reflektuje se o sjajne ili glatke površine. Tamne i grube površine imaju veliku moć apsorpcije, pa deo upadnih talasa biva apsorbovan, a preostali deo upadnih talasa prolazi kroz telo.

Procenat raspodele upadnog zračenja može se predstaviti Kirhofovom zakonom zračenja tela, koji predstavlja odnos između intenziteta zračenja koje pada na telo ϕ i intenziteta zračenja koje telo apsorbuje ϕ_a , intenziteta zračenja koje se reflektuje od strane tela ϕ_r i intenziteta zračenja koje telo propušta ϕ_p . Navedeni odnos može se predstaviti sledećim izrazom:

$$\phi = \phi_a + \phi_r + \phi_p \quad (3.15)$$

Mnogo poznatiji oblik Kirhofovog zakona zračenja je relativni oblik predstavljen sledećim izrazom:

$$1 = \frac{\phi_a}{\phi} + \frac{\phi_r}{\phi} + \frac{\phi_p}{\phi} = \alpha_a + \alpha_r + \alpha_p \quad (3.16)$$

gde je $\alpha_a = \phi_a / \phi$ koeficijent apsorpcije, $\alpha_r = \phi_r / \phi$ je koeficijent refleksije, a $\alpha_p = \phi_p / \phi$ je koeficijent propuštanja zračenja koje pada na telo.

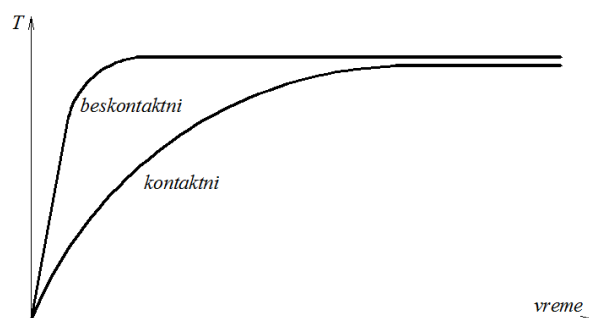
Telo koje ima koeficijent apsorpcije jednak jedinici naziva se apsolutno crno telo, i to je telo koje apsorbuje celokupno zračenje koje padne na njega, a, takođe, za datu temperaturu emituje maksimalno moguću količinu toplotnog zračenja. Sposobnost nekog tela da emituje toplotno zračenje naziva se emisivnost, koja je izražena koeficijentom emisivnosti. Koeficijent emisivnosti za apsolutno crno telo iznosi 1, dok za sva ostala tela i materijale ima manju vrednost.

Merenje temperature primenom senzora IR zračenja temelji se na zakonima koji predstavljaju vezu između energije koju zrači crno telo i njegove temperature. Odnos između temperature i gustine zračenja za sve frekvencije elektromagnetnog zračenja crnog tela predstavlja Stefan-Boltzmann-ov zakon dat sledećim izrazom:

$$j^* = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.17)$$

gde je j^* gustina spektralnog zračenja, $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8}$ [Wm⁻²K⁻⁴] Stefan- Boltzmann-ova konstanta, a ε je koeficijent emisivnosti.

Jedna od prednosti beskontaktna metode merenja temperature tela je velika brzina odziva senzora u poređenju sa kontaktnim sensorima kod kojih se prenos toplote odvija sporije [51], što se može videti na slici 3.10.



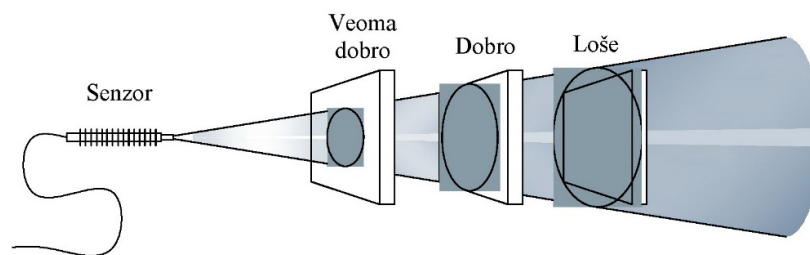
Slika 3.10 Poređenje između brzine odziva kontaktnih i beskontaktnih senzora

Zakoni zračenja crnog tela predstavljaju osnovu za izradu temperaturnih senzora IR zračenja. Izgled tipičnog temperaturnog senzora IR zračenja prikazan je na slici 3.11.



Slika 3.11 Izgled tipičnog temperaturnog senzora IR zračenja

IR temperaturni senzor detektuje energiju emitovanu od strane „merne” kružne površine. Površina kruga zavisi od ugla polja vidljivosti (engl. Field of View – FOV) i rastojanja između senzora i tela čija se temperatura meri [51, 52]. Dakle, za tačno merenje temperature nekog tela primenom IR temperaturnog senzora neophodno je montirati senzor na odgovarajuće rastojanje, tako da merni krug u potpunosti obuhvata površinu tela na način prikazan na slici 3.12. Ukoliko je površina mernog kruga veća od površine tela čija se temperatura meri, IR temperaturni senzor detektovaće IR zračenje tela obuhvaćenih mernim krugom i na taj način vršiti neželjeno merenje njihove temperature.



Slika 3.12 Usmeravanje IR senzora na mernu površinu

Sposobnost IR temperaturnog senzora da meri temperaturu tela malih dimenzija određuje se preko optičke rezolucije, koja se može predstaviti sledećim izrazom:

$$O_R = \frac{d}{r_c} \quad (3.18)$$

gde je d rastojanje između senzora i tela čija se temperatura meri, a r_c je poluprečnik mernog kruga.

Što je optička rezolucija veća, IR temperaturni senzor može meriti temperaturu tela sve manjih dimenzija.

Izlazni napon IR temperaturnog senzora određuje se pomoću Stefan-Boltzmann-ovog zakona i može se predstaviti sledećim izrazom:

$$U \approx \varepsilon \cdot T^4 \quad (3.19)$$

Uzimajući u obzir reflektovano ambijentalno zračenje i zračenje koje emituje sam senzor, izlazni napon senzora može se predstaviti kao:

$$U = C \cdot (\varepsilon \cdot T_{obj}^n + (1 - \varepsilon) \cdot T_a^n - T_{sen}^n) \quad (3.20)$$

gde je C specifična konstanta senzora, T_{obj} je temperatura tela koja se meri, a T_{sen} je temperatura IR temperaturnog senzora. Eksponent n zavisi od talasne dužine IR zračenja kojim se merenje izvodi i može imati širok opseg vrednosti.

Transformacijom izraza (3.20) može se dobiti izraz za proračun temperature tela, koji se može predstaviti kao:

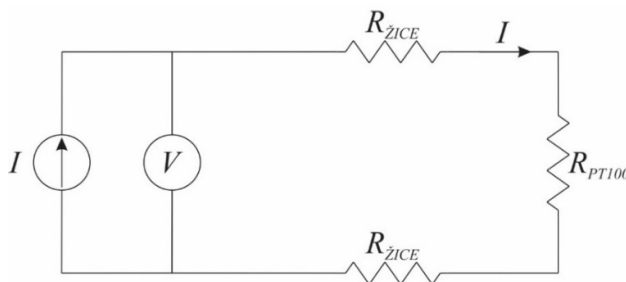
$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_a^n + C \cdot \varepsilon \cdot T_a^n + C \cdot T_{sen}^n}{C \cdot \varepsilon}} \quad (3.21)$$

Vodena para, prašina i dim mogu umanjiti tačnost merenja IR temperaturnih senzora. Ovi senzori predstavljaju idealno rešenje za merenje temperature pokretnih i teško pristupačnih predmeta, dok se, prema dostupnim saznanjima, uopšte nisu koristili za merenje temperature PV modula.

3.6 Četvorožično merenje otpornosti RTD temperaturnih senzora

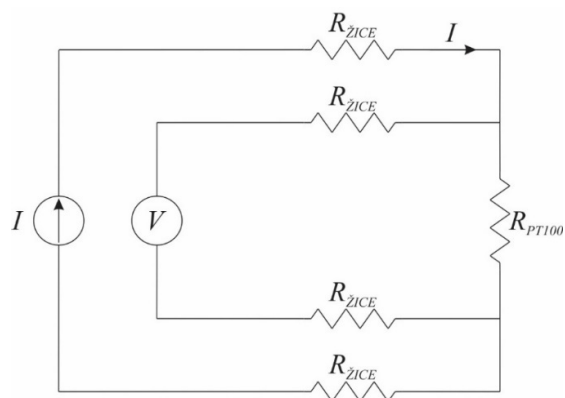
Merni instrumenti merenje otpornosti RTD temperaturnog senzora obavljaju propuštanjem struje konstantnog i poznatog intenziteta kroz njega, nakon čega se vrši merenje napona koji se generiše na njemu. Na osnovu ova dva poznata parametra, otpornost RTD temperaturnog senzora dobija se prostom računicom iz Omovog zakona.

Par žica kojima je RTD temperaturni senzor povezan na merni instrument (slika 3.13) može prouzrokovati grešku merenja, pogotovu ako se radi o dugačkim žicama, što je inače čest slučaj. Naime, ukoliko je otpornost RTD temperaturnog senzora velika, uticaj otpornosti para žica može se zanemariti. Međutim, ukoliko je otpornost RTD temperaturnog senzora mala, kao što je slučaj sa senzorom Pt100, otpornost para žica može značajno uticati na tačnost merenja tako što će njihova otpornost stvoriti mali pad napona na njima, koji će zajedno sa naponom na RTD temperaturnom senzoru biti izmeren od strane analogno-digitalnog konvertora (engl. Analog-to-Digital Converter – ADC) mernog instrumenta [53]. S obzirom na to da otpornost para žica može biti i $2\ \Omega$, prilikom merenja otpornosti od svega $100\ \Omega$ (pa i manje) merna greška iznosi 2% (čak i više u slučaju niže otpornosti senzora), što se u preciznoj instrumentaciji može smatrati velikom greškom.



Slika 3.13 Šema dvožičnog merenja otpornosti

Imajući u vidu nedostatak dvožične metode za merenje malih otpornosti RTD temperaturnih senzora, mnogo bolje rešenje predstavlja četvorožično (Kelvin-ovo) merenje otpornosti RTD temperaturnih senzora, čija je šema prikazana na slici 3.14.



Slika 3.14 Šema četvorožičnog merenja otpornosti

U četvorožičnoj metodi merenja otpornosti RTD temperaturnih senzora konstantna struja se sprovodi pomoću jednog para žica, a napon na senzoru meri pomoću drugog para žica. Oba para žica neophodno je po mogućstvu povezati direktno na RTD senzor kako bi gubici bili što manji. Ovom metodom merenja otpornosti RTD temperaturnih senzora eliminiše se merenje napona na žicama koje se javlja kod dvožičnog merenja otpornosti, usled čega je tačnost merenja veća.

4. NAČINI MERENJA TEMPERATURE PV MODULA

Iako temperatura PV modula ima ogroman uticaj na njihovu efikasnost, nažalost u naučnoj i stručnoj literaturi nema mnogo materijala koji se bavi samom problematikom procesa njenog merenja. Kao posledica toga, u pojedinim istraživanjima primetne su neodgovarajuće metode za merenje temperature PV modula, usled čega su njihova merenja nepouzdana.

Rezultati detaljne analize dostupne naučne literature pokazali su da je trenutno jedini primenjivani način za merenje temperature PV modula zasnovan na kontaktnim temperaturnim senzorima, dok beskontaktni temperaturni senzori nisu imali primenu.

U mnogim istraživanjima, temperatura PV modula koja je izmerena smatrana je apsolutno tačnom, uprkos činjenici da nema nikakvog opisa primenjene merne metodologije, a ponekad čak nema ni navođenja tipa korišćenog temperaturnog senzora, kao što je to slučaj sa istraživanjima publikovanim u radovima [54, 55, 56]. Neophodno je naglasiti da rad [55] ipak pruža par informacija o mernoj metodologiji, jer se navodi da su upotrebljeni termički izolovani kontaktni temperaturni senzori, pri čemu nije precizirano o kom se tipu temperaturnih senzora radi. U radovima [57, 58, 59] jedino je navedeno da je za merenje temperature PV modula upotrebljen temperaturni senzor Pt100. Slično, u radovima [60, 61, 62] jedino je navedeno da je upotrebljen temperaturni senzor LM35, a isto je urađeno i u radu [63], gde je navedeno da je korišćen temperaturni senzor DS18B20. Sa druge strane, u radu [64] navedeno je da je merenje temperature PV modula izvedeno pomoću termopara.

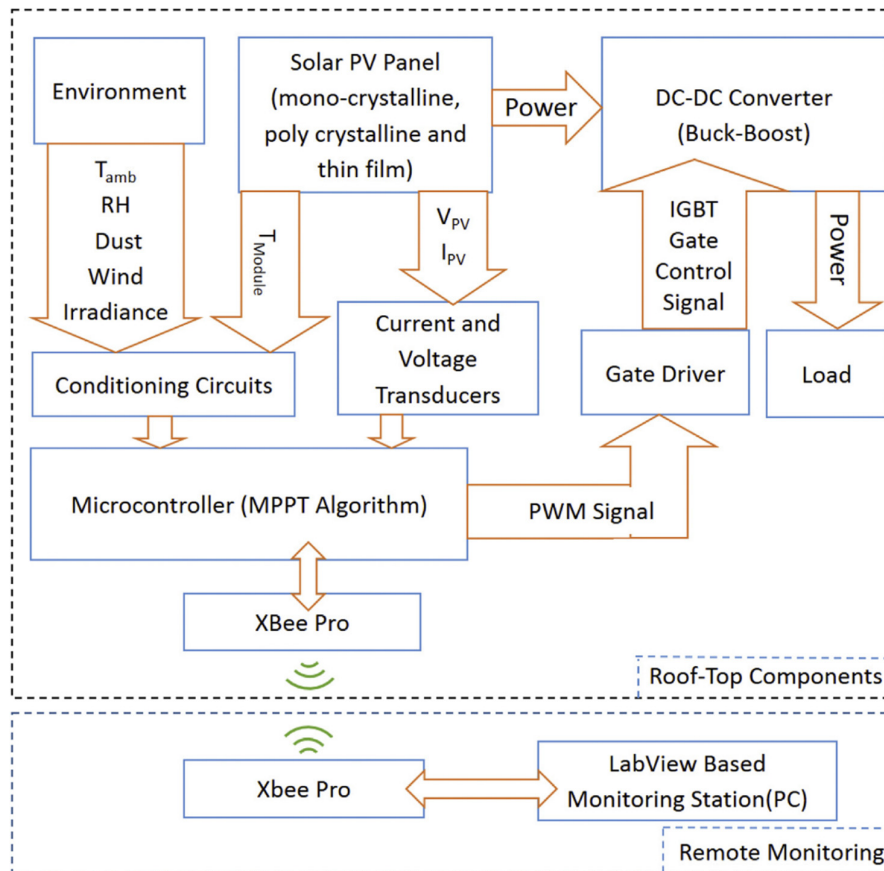
U nastavku izlaganja izvršena je temeljna analiza nekoliko najreprezentativnijih metoda za merenje temperature PV modula koje se sreću u literaturi. Biće reči o njihovim prednostima, ali i nedostacima.

4.1 Rešenje zasnovano na Pt100 senzoru

Kao što je već naglašeno, Pt100 senzori koriste se u različitim merenjima temperature, pa tako imaju primenu i u merenju temperature PV modula. U najvećem broju slučajeva akvizicija merenja sa Pt100 senzora obično se sprovodi pomoću komercijalnih mernih

instrumenata i sistema. Međutim, ponekad se pristupa izradi sopstvenog rešenja i jedno takvo autorsko rešenje predstavljeno je u radu [65]. Predstavljani merni sistem zasnovan je na Pt100 senzoru klase tačnosti B čija je oznaka RTF4, a koji izrađuje renomirana firma Labfacility [66]. Navedeni Pt100 senzor često se koristi za merenje temperature PV modula i zapravo predstavlja najčešće korišćeni izbor kada se radi o Pt100 senzorima, uprkos činjenici da navedeni senzor nije nimalo jeftin.

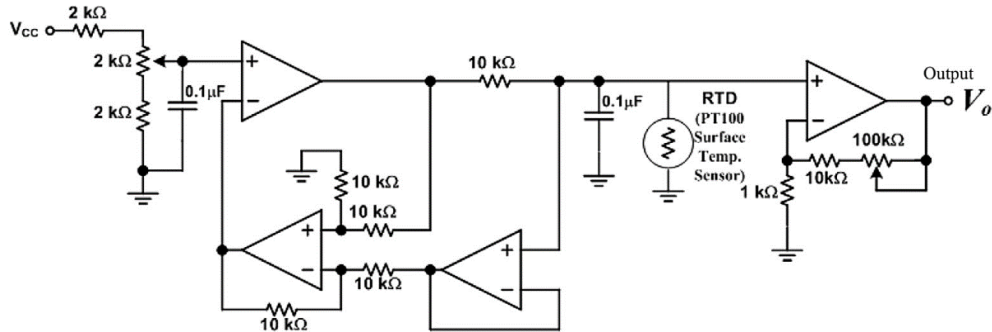
Rešenje predstavljeno u radu [65] zapravo predstavlja kompleksan merni sistem koji, pored merenja temperature PV modula, vrši kontinuirano merenje više parametara. Blok dijagram ovog sistema prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 Blok dijagram sistema predstavljenog u radu [65]

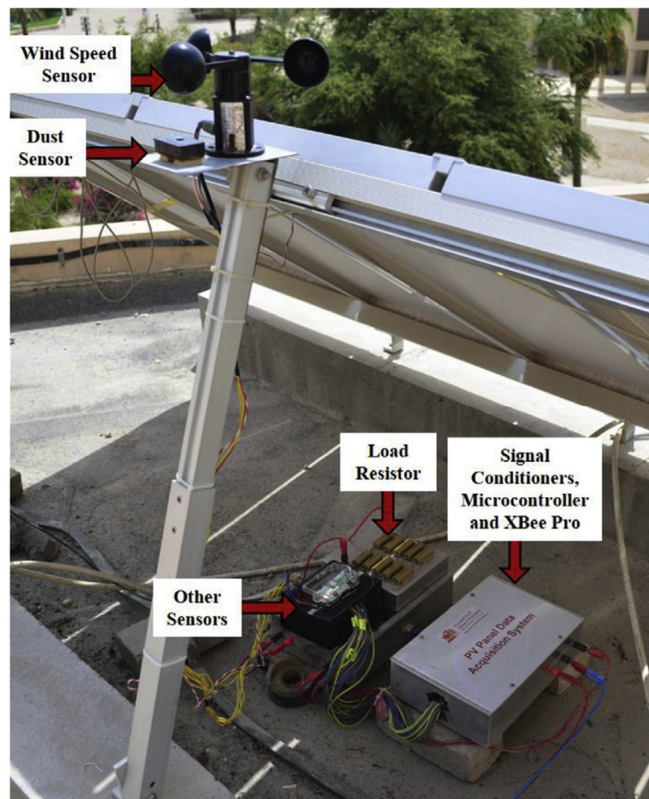
Neophodno je naglasiti da su autori izvršili kalibraciju realizovanog sistema primenom referentnog instrumenta BK Precision 720, neposredno pre ugradnje RTF4 senzora.

Pobuđivanje RTF4 senzora izvršeno je pomoću izvora konstantne struje čija je šema prikazana na slici 4.2, a pad napona na RTF4 senzoru pojačan je neinvertujućim pojačavačem, što se takođe može videti sa slike 4.2.



Slika 4.2 Šema sistema realizovanog u radu [65]

Nakon realizacije sistema, autori su izvršili njegovu implementaciju na eksperimentalnoj PV elektrani montiranoj na ravnom krovu, kao što je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3 Implementacija sistema realizovanog u radu [65]

Iako se senzor RTF4 veoma često koristi za merenje temperature PV modula, autori predloženog rešenja napravili su veliki previd, jer dobijena merenja temperature PV modula nisu verifikovali referentnim instrumentom. Rezultati dobijeni testiranjem predloženog sistema prikazani su na slici 4.4.

Time	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	PV surface Temp. °C	Irradiance (W/m ²)	Dust (mg/m ³)	Wind speed (m/s)	Maximum power (W)	
	03:00 PM	29.88	37.86	40.84	428.65	0.12	1.40	47.72
	04:00 PM	26.56	48.16	35.37	158.46	0.13	1.31	18.65
	05:00 PM	25.88	37.54	30.69	49.41	0.13	1.50	1.46
	06:00 PM	23.24	51.34	28.35	0.00	0.17	1.01	0.00
	07:00 PM	22.07	68.30	25.23	0.00	0.20	0.86	0.00
March 2015	07:00 AM	19.24	86.54	25.62	223.57	0.15	2.00	22.83
	06:00 AM	13.09	73.54	21.32	44.53	1.15	0.00	1.18
	07:00 AM	18.85	61.64	11.57	287.04	0.74	0.00	23.35
	08:00 AM	21.00	55.46	33.03	479.10	0.10	0.00	45.01
	09:00 AM	21.58	57.04	35.37	231.71	0.77	0.00	20.81
	10:00 AM	24.12	56.25	41.23	881.12	0.40	1.35	88.08
	11:00 AM	23.34	57.52	35.76	767.19	0.24	0.46	87.14
	12:00 PM	23.63	52.29	39.28	954.36	0.38	0.61	93.02
	01:00 PM	21.39	45.15	32.64	650.00	5.68	0.22	58.99
	02:00 PM	23.54	47.69	39.28	620.70	0.32	1.31	64.04
	03:00 PM	20.41	46.26	27.57	379.82	0.85	1.55	34.51
	04:00 PM	18.95	51.49	20.93	73.83	0.94	0.02	3.55
	05:00 PM	19.24	53.08	17.42	52.67	0.91	0.00	1.68
	06:00 PM	17.38	56.41	18.59	0.00	1.01	0.02	0.00
April 2015	07:00 PM	16.70	57.84	17.03	0.00	1.03	0.00	0.00
	06:00 AM	19.34	74.65	24.45	104.17	0.73	3.10	8.30
	07:00 AM	23.24	61.80	36.93	421.55	0.69	2.21	43.12
	08:00 AM	24.22	56.25	38.10	683.59	0.73	4.16	74.10
	09:00 AM	28.32	38.49	48.25	857.75	0.74	5.94	88.52
	10:00 AM	27.93	31.67	49.42	1027.02	0.69	5.77	101.10
	11:00 AM	28.52	30.72	50.20	1027.02	0.66	11.46	101.42
	12:00 PM	29.00	30.56	51.76	981.45	0.69	6.30	96.22
	01:00 PM	29.30	30.72	51.76	859.38	0.81	3.45	84.48
	02:00 PM	29.30	30.56	44.74	678.71	0.69	10.57	67.29
	03:00 PM	28.52	30.40	41.62	79.75	0.77	5.23	33.45
	04:00 PM	27.25	30.40	34.20	52.08	0.72	6.48	3.70
	05:00 PM	26.66	30.56	31.47	29.30	0.69	5.23	1.56
	06:00 PM	25.29	30.56	27.18	0.00	0.69	2.74	0.00
May 2015	07:00 PM	23.73	31.67	27.96	0.00	0.71	6.48	0.00
	06:00 AM	29.78	69.82	69.82	25.73	0.85	0.72	0.00
	07:00 AM	32.22	70.93	70.93	178.72	0.90	0.32	11.13
	08:00 AM	35.74	54.43	54.43	404.96	0.82	0.81	40.03
	09:00 AM	36.91	41.11	41.11	636.08	0.79	0.42	66.91
	10:00 AM	38.38	32.39	32.39	793.96	0.80	1.06	82.76
	11:00 AM	39.45	28.43	28.43	896.50	0.85	1.70	92.02
	12:00 PM	39.45	28.58	28.58	924.17	1.30	1.11	94.37
	01:00 PM	37.89	26.84	26.84	828.14	1.45	0.72	86.79
	02:00 PM	36.62	27.63	27.63	741.88	1.31	1.16	72.22
	03:00 PM	34.96	46.35	46.35	585.63	1.26	0.17	40.04
	04:00 PM	35.64	30.49	30.49	181.98	1.12	1.01	14.19
	05:00 PM	34.08	42.38	42.38	111.99	0.76	0.32	6.18
	06:00 PM	33.20	42.38	42.38	33.87	0.02	0.32	0.00
2 nd June 2015	07:00 PM	32.61	49.84	49.84	0.00	0.64	0.62	0.00
	05:00 AM	29.38	67.37	38.92	14.08	0.87	1.77	0.21
	06:00 AM	31.17	58.33	43.15	170.76	0.96	1.57	16.58
	07:00 AM	34.02	38.35	49.91	389.40	0.86	1.62	38.56
	08:00 AM	36.46	29.94	52.45	613.50	0.71	2.76	60.40
	09:00 AM	39.96	29.15	54.99	770.18	0.71	2.26	69.95
	10:00 AM	42.16	28.52	61.75	843.06	0.85	1.47	74.38
	11:00 AM	44.68	32.48	83.73	1050.76	1.33	5.23	77.03
	12:00 PM	43.70	28.52	60.06	812.09	1.40	2.41	69.89
	01:00 PM	44.03	28.67	60.06	704.59	1.33	2.81	62.30
	02:00 PM	43.54	28.67	56.68	544.26	1.16	1.72	48.44
	03:00 PM	42.81	28.83	51.60	134.33	1.03	3.00	10.04
	04:00 PM	42.24	28.99	49.91	88.78	0.86	2.41	4.96
	05:00 PM	41.50	28.99	49.07	48.69	0.76	2.46	1.44
16 th June 2015	06:00 PM	39.88	28.99	45.69	3.15	0.02	1.62	0.00
	07:00 PM	39.88	33.27	44.13	0.00	0.64	1.62	0.00
	05:00 AM	31.01	68.16	59.21	114.28	0.63	8.14	0.30
	06:00 AM	31.58	53.26	43.15	170.76	0.82	7.25	14.53
	07:00 AM	33.20	43.11	49.07	396.69	0.89	5.12	37.41
	08:00 AM	34.99	33.43	53.30	562.48	0.91	8.14	55.45
	09:00 AM	37.60	29.31	55.83	731.92	0.70	6.72	66.73
	10:00 AM	39.63	28.52	60.91	833.95	1.12	6.19	75.05
	11:00 AM	40.93	28.52	63.44	875.86	0.89	5.65	71.80
	12:00 PM	40.93	28.99	62.60	866.75	0.86	8.85	68.97
	01:00 PM	39.88	30.89	55.83	730.10	0.79	8.14	61.84
	02:00 PM	39.39	28.99	54.14	566.13	0.91	6.72	46.74
	03:00 PM	37.84	29.63	48.22	137.97	0.84	7.61	10.60
	04:00 PM	39.23	29.94	43.15	92.42	0.67	6.54	5.73

Slika 4.4 Rezultati testiranja u radu [65]

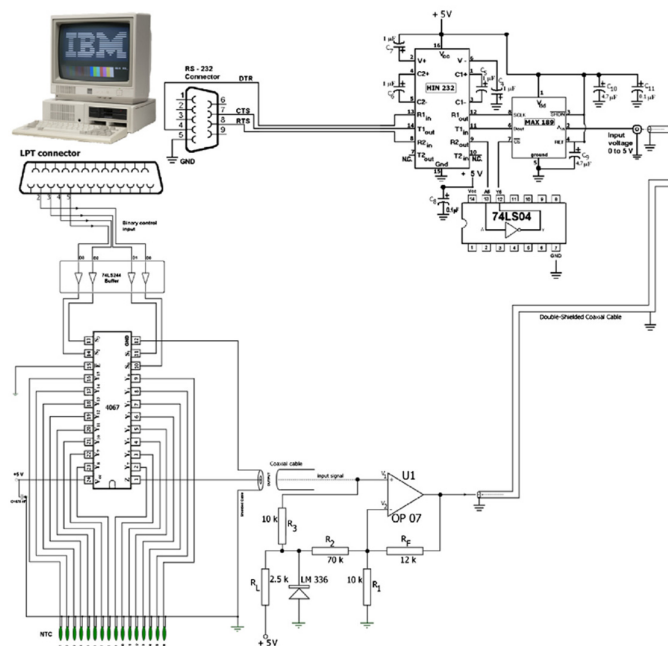
Druga velika zamerka na kvalitet rada, koja dovodi u sumnju dobijene rezultate, je greška u prikazu rezultata merenja za mesec maj, gde su rezultati merenja temperature PV modula zapravo kopirane vrednosti relativne vlažnosti vazduha zabeležene u tom mesecu.

4.2 Rešenje zasnovano na NTC senzoru

U radu [67] prikazana je realizacija jednog jeftinog višekanalnog sistema za merenje temperature PV modula zasnovanog na keramičkim NTC termistorima.

Pošto su NTC termistori izrazito nelinearni senzori, autori su najpre izvršili njihovu individualnu linearizaciju u temperaturnom opsegu od -20°C do 120°C . Linearizacija je izvedena u izotermalnim uslovima tako što su senzori smešteni u temperaturnu komoru u kojoj je temperatura merena referentnim instrumentima, a merenja na NTC termistorima su izvršena pomoću elektrometra Keithley 6512. Nakon sprovedene kalibracije ostvarena je tačnost merenja svih NTC termistora bolja od 0.1°C u odnosu na uporedna merenja referentnog instrumenta, što se može smatrati odličnom vrednošću.

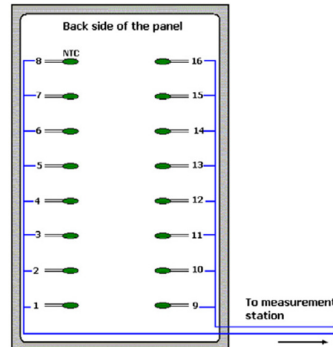
Nakon kalibracije svih NTC termistora pristupilo se realizaciji 16-kanalnog mernog sistema, čija je blok šema prikazana na slici 4.5. Na osnovu blok šeme jasno se zaključuje da osnovu realizovanog sistema čini računar (engl. Personal Computer – PC), koji upravlja radom 16-u-1 multipleksera kojim se vrši odabir senzora sa koga se vrši akvizicija izmerene temperature. Pored toga, PC obavlja direktnu komunikaciju sa 12-bitnim ADC-om MAX189 serijskom vezom, što predstavlja neadekvatno rešenje. Naime, praktikuje se da veza između PC-a i ADC-a ide preko posrednika, odnosno mikrokontrolera (engl. Microcontroller Unit – MCU).



Slika 4.5 Blok šema sistema realizovanog u radu [67]

Budući da otpornost NTC termistora opada sa porastom temperature, u cilju postizanja što veće rezolucije merenja autori su izvršili pojačanje napona generisanog na NTC termistoru odgovarajućim diferencijalnim pojačavačem.

Nakon realizacije predloženog sistema pristupilo se montaži NTC termistora na PV modul i testiranju sistema. Autori su želeli da mere temperaturu svake PV ćelije određenog PV modula, pa su iz tog razloga na poledinu svake PV ćelije fiksirali po jedan NTC termistor prema šemi raspodele prikazanoj na slici 4.6.



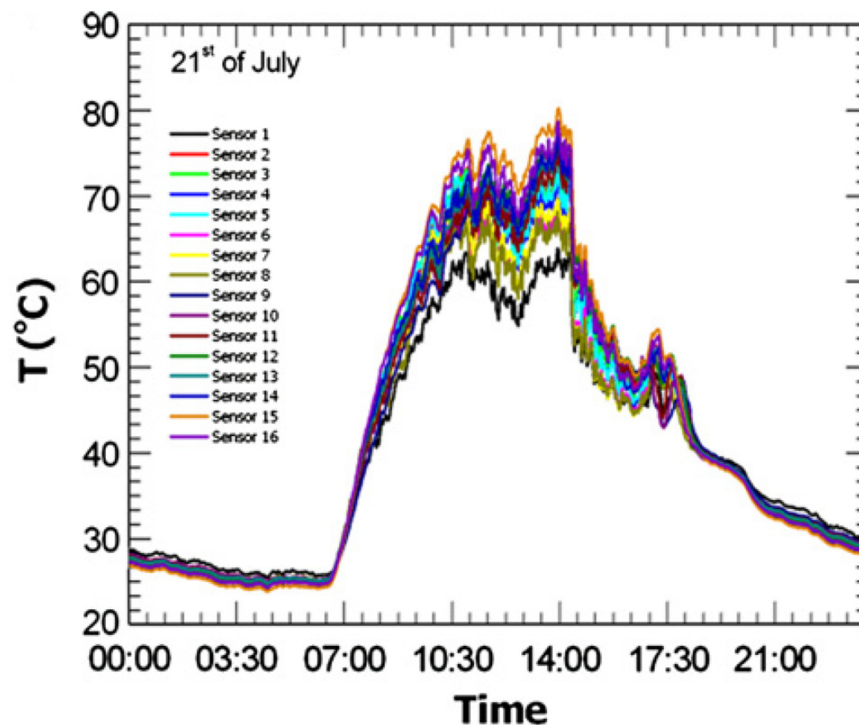
Slika 4.6 Šema raspodele NTC termistora na PV modulu u radu [67]

Nažalost, autori ovog rešenja nisu priložili oznaku, niti sliku NTC termistora, kao ni sliku montiranih NTC termistora na pozadinu PV modula, na osnovu kojih bi se videlo kako su NTC termistori montirani na PV modul. Naime, kao što je već naglašeno i prikazano na slici 3.5, kućišta NTC termistora su najčešće zaobljena i izrazito neravna, usled čega je njihova montaža na ravno telo veoma nezgodna i nepraktična. Drugim rečima, veoma je teško ostvariti dobar termički kontakt između poledine PV modula i NTC termistora, čime bi se mogla garantovati tačnost merenja.

Još jedan veliki propust predstavlja činjenica da NTC termistori uopšte nisu termički izolovani, tako da su većim delom svoje površine izloženi ambijentalnom uticaju. Iz uvodnog izlaganja predstavljenog u poglavlju 3 nedvosmisleno je pokazano da merenja temperature nekog tela dobijena neizolovanim kontaktnim temperaturnim senzorom nisu tačna usled pojave termalnog gradijenta na kućištu senzora. Dakle, sasvim je očekivano da merenja dobijena termički neizolovanim NTC termistorima neće biti tačna.

Pored toga, autori predloženog rešenja napravili su isti propust kao i u slučaju istraživanja predstavljenog u poglavlju 4.1, odnosno u radu [65]. Radi se o tome da nisu izvršili verifikaciju dobijenih merenja primenom referentnog instrumenta, što dodatno ide u prilog činjenici da dobijena merenja nisu u potpunosti tačna.

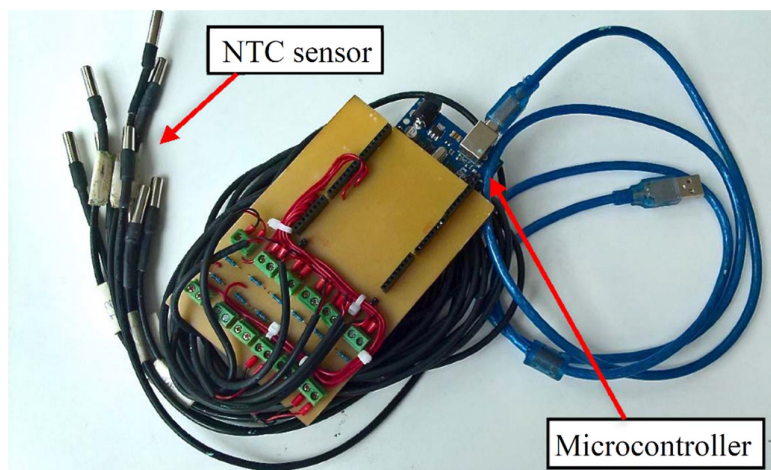
Opisu testiranja realizovanog sistema autori nisu posvetili dovoljno pažnje, već su više pažnje posvetili manje bitnim činjenicama, kao što je uticaj dužine provodnika kojima su NTC termistori povezani i njihova osetljivost na temperaturne promene. Iako je nakon kalibracije ostvarena velika tačnost merenja, autori zanemaruju činjenicu da ona važi isključivo u izotermalnim uslovima. Naime, usled izostanka referentnih merenja, tačnost merenja dobijenih termički neizolovanim NTC termistorima na kojima se javlja termalni gradijent u potpunosti je nepredvidiva. Upravo iz tog razloga se može uočiti krajnje nelogična velika razlika između temperatura PV ćelija istog PV modula, koju autori navode. Rezultati dobijeni primenom realizovanog instrumenta prikazani su na slici 4.7.



Slika 4.7 Rezultati testiranja sistema realizovanog u radu [67]

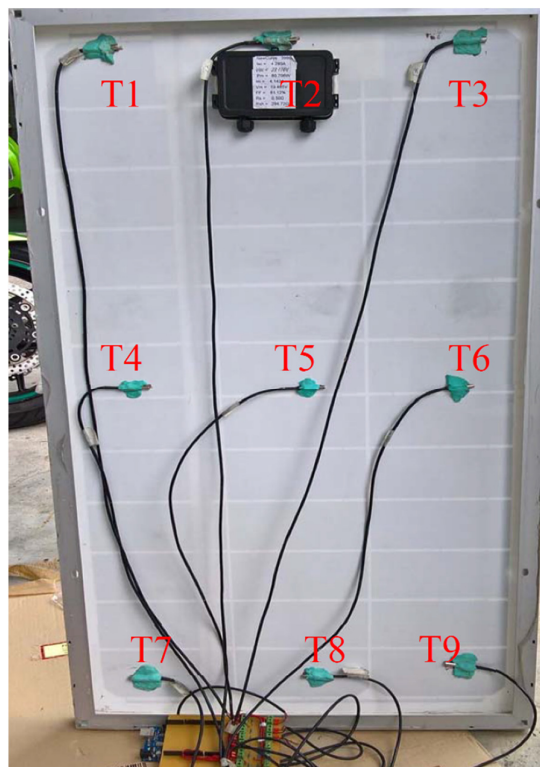
Razlika od gotovo 20°C između uporednih merenja temperature PV ćelija jednog PV modula zahteva dodatna objašnjenja pod kojim uslovima su vršena merenja. Navedena razlika u temperaturama je moguća isključivo ako su određene PV ćelije bile zasenčene ili ukoliko temperaturni merni sistem nije pravilno kalibrisan i ima određeni ofset. Međutim, u radu je naglašeno da su svi senzori individualno kalibrisani, tako da tačnost mernog sistema ne treba dovoditi u pitanje, usled čega, kao uzrok navedene razlike, jedino preostaje neadekvatna termička izolacija temperaturnih senzora ili loš kontakt sa PV ćelijom čija se temperatura meri.

Problem montaže NTC termistora na površinu PV modula najbolje se ogleda u istraživanju publikovanom u radu [68], gde je izvršena realizacija višekanalnog sistema za merenje temperature PV modula zasnovanog na 9 NTC termistora, prikazanog na slici 4.8.



Slika 4.8 Izgled sistema realizovanog u radu [68]

Montaža NTC termistora na PV modul u radu [68] izvedena je bez ikakve termičke izolacije njihovim lepljenjem pomoću lepljive trake, kao što je prikazano na slici 4.9.



Slika 4.9 Način montaže NTC termistora na PV modul u radu [68]

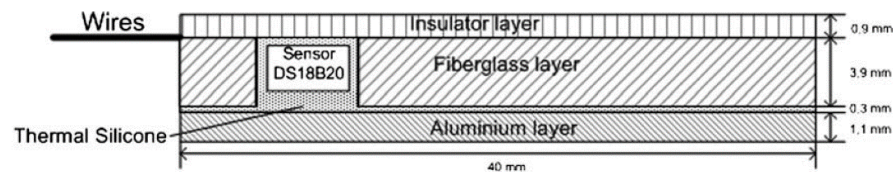
Kao što se može videti sa slika 4.8 i 4.9, veći deo površine tela NTC termistora izložen je ambijentalnom uticaju, za razliku od manjeg dela površine tela termistora koji je u fizičkom kontaktu sa PV modulom, usled čega merenja ovog sistema neće biti u potpunosti tačna.

4.3 Rešenje zasnovano na senzoru DS18B20

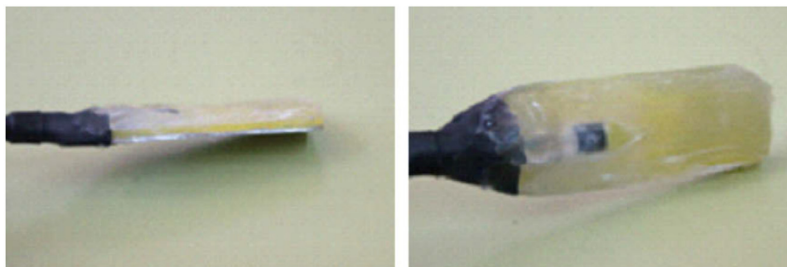
U realizaciji mnogih mernih sistema njihova cena predstavlja ograničavajući faktor. S tim u vezi, sve je veći broj rešenja za merenje temperature PV modula zasnovanih na jeftinim senzorima. Jedno od takvih je i rešenje predstavljeno u radu [69], koje je zasnovano na senzoru DS18B20 [70], a koje po tvrdnji autora tog sistema nudi preciznost koja se može porediti sa sistemima zasnovanim na Pt100 senzorima.

Prednosti digitalnog senzora DS18B20 su što se isporučuje fabrički kalibrisan, ne zahteva kompleksnu analognu elektroniku kao većina analognih senzora, a komunikaciju sa MCU-om ostvaruje putem 1-wire protokola koji zahteva samo jednu žicu, na koju je moguće povezati više ovih senzora. Inače, sam senzor je smešten u standardno TO-92 kućište.

Autori predloženog rešenja najpre su izvršili realizaciju sonde za merenje temperature PV modula tako što su ravan deo senzora DS18B20 priljubili na tanku aluminijumsku pločicu, nakon čega su izvršili njihovo trajno vezivanje pomoću više slojeva ugljeničnih vlakana, koji ujedno služe kao termička izolacija. Struktura realizovane temperaturene sonde prikazana je na slici 4.10, a njen izgled prikazan je na slici 4.11 [69].

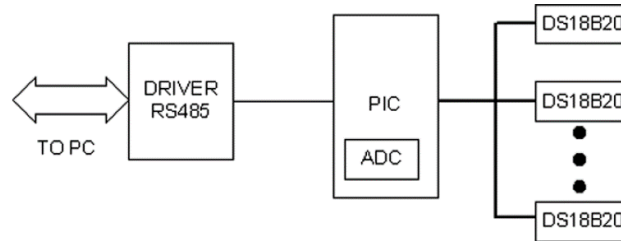


Slika 4.10 Struktura temperaturene sonde u radu [69]



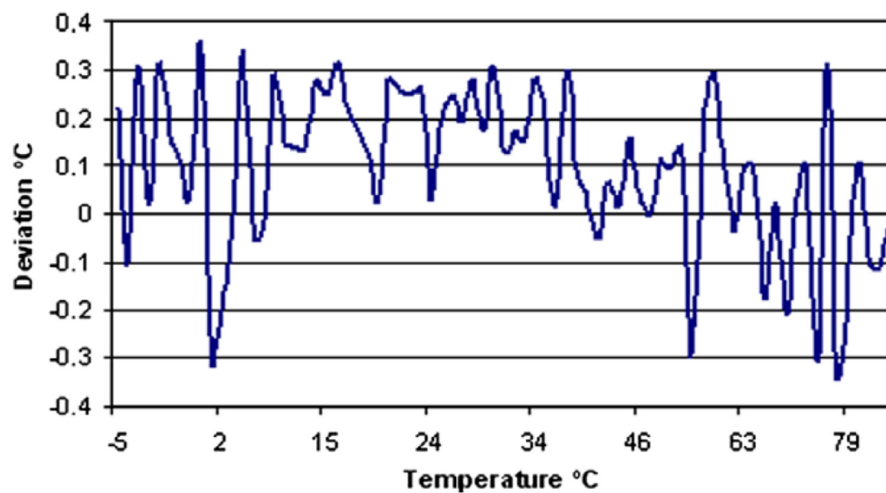
Slika 4.11 Izgled temperaturene sonde u radu [69]

Osnovu realizovanog sistema čini MCU PIC18F2520 na koji je putem 1-wire magistrale povezano više realizovanih temperaturnih sondi, a koje komunikaciju sa računarom obavljaju putem RS485 komunikacije. Blok dijagram realizovanog sistema prikazan je na slici 4.12.



Slika 4.12 Blok dijagram sistema realizovanog u radu [69]

Nakon realizacije sistema, autori su izvršili njegovu kalibraciju u izotermalnim uslovima, odnosno u temperaturno kontrolisanom akvarijumu, pomoću referentnog senzora Pt100 klase tačnosti A. Kalibracija je izvedena u temperaturnom opsegu od -5°C do 85°C sa usrednjavanjem, a merenja sa Pt100 senzora su obavljena pomoću akvizicionog sistema Field Point FP-1001. Razlika uporednih merenja između realizovanog sistema i referentnog instrumenta prikazana je na slici 4.13.



Slika 4.13 Razlika između uporednih merenja u radu [69]

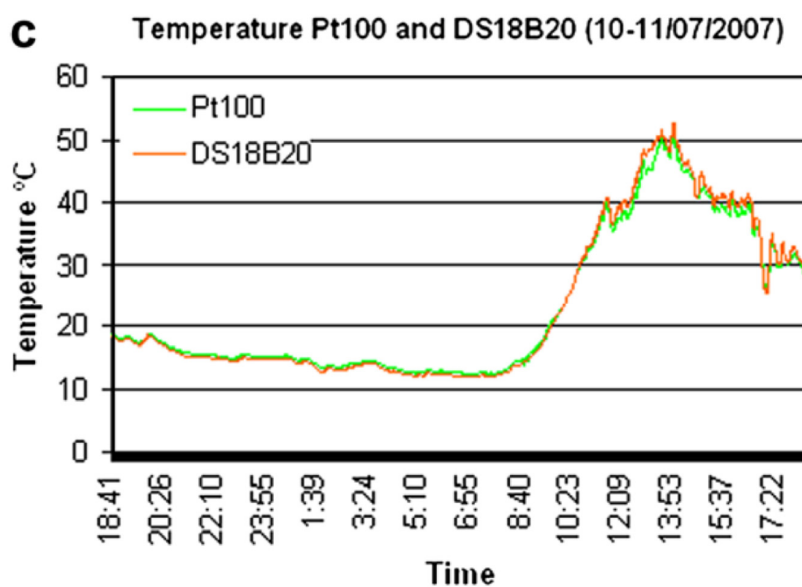
Razlika između uporednih merenja prikazana na slici 4.13 nedvosmisleno ukazuje na visoku tačnost merenja realizovanog sistema. Nakon uspešne kalibracije autori su izvršili testiranje predloženog sistema u realnim uslovima rada na PV modulu koji je postavljen na

ravan krov. Prilikom ovog testiranja izvršena je validacija merenja predloženog sistema pomoću referentnog Pt100 senzora RTF4, koji se zalepljen na pozadinu PV modula svega par centimetara od realizovane temperature sonde, kao što je prikazano na slici 4.14 [69]. Kao i u slučaju kalibracije, merenja sa referentnog senzora RTF4 obavljena su pomoću akvizicionog sistema Field Point FP-1001.



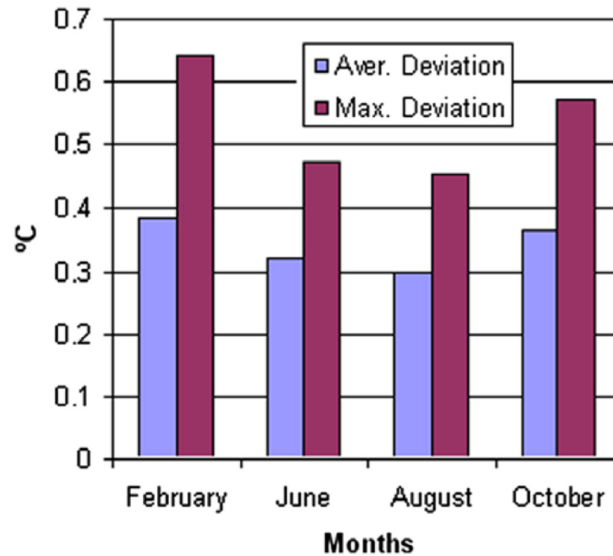
Slika 4.14 Montaža senzora u radu [69]

Rezultati testa u realnim uslovima rada zabeleženi u periodu od jednog letnjeg dana prikazani su na slici 4.15.



Slika 4.15 Rezultati testiranja u realnim uslovima u radu [69]

Razlika između uporednih merenja pomoću realizovanog sistema i referentnog sistema na nivou od nekoliko meseci prikazana je na slici 4.16.

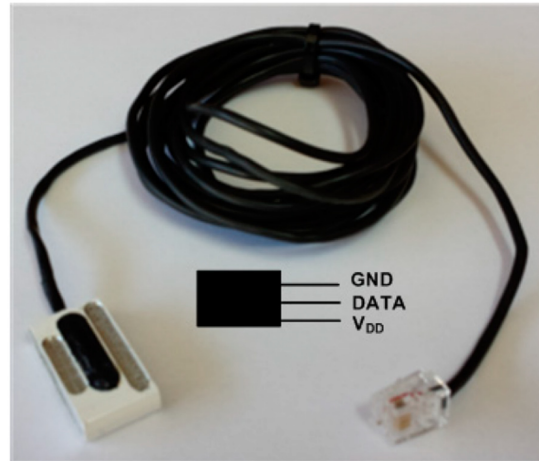


Slika 4.16 Razlika između uporednih merenja na nivou od nekoliko meseci u radu [69]

Sa slike 4.16 vidi se da je maksimalna zabeležena razlika između uporednih merenja svega 0.64°C , što se može smatrati dobrim rezultatom. Osim toga, srednja razlika između uporednih merenja je veoma slična u svim mesecima u kojima su vršena merenja, što je odlično.

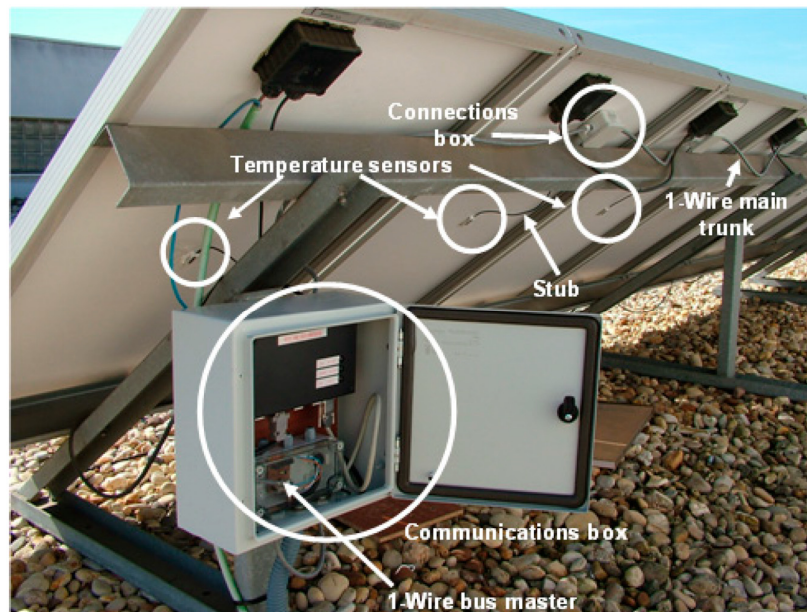
Na osnovu merenja prikazanih na slici 4.15 može se uočiti da je maksimalna temperatura PV modula lociranog u Španiji u julu mesecu svega 50°C , a minimalna svega $12\text{--}13^{\circ}\text{C}$, što je daleko ispod očekivanih vrednosti imajući u vidu geografsku lokaciju Španije i prosečne ambijentalne temperature za mesec jul, koje neretko dostižu vrednost od 40°C . Nažalost, autori ovog rešenja nisu naveli pod kojim ambijentalnim uslovima su dobijena prikazana merenja.

U nastavku istraživanja publikovanog u radu [69], neki od njegovih autora su u novom radu [71] predložili modifikovanu verziju temperaturne sonde zasnovanu na senzoru DS18B20, koju, naizgled, odlikuje bolja termička izolacija. Nažalost, autori predloženog rešenja nisu naveli od kog materijala je izrađena termička izolacija, niti kako je ista izvedena, a izgled modifikovane temperaturne sonde je prikazan je na slici 4.17.



Slika 4.17 Izgled modifikovane temperaturne sonde u radu [71]

Iako to nije naglašeno, može se pretpostaviti da realizovani merni sistem ima sličnu, ako ne i identičnu, strukturu kao i prethodna verzija sistema, a koja je prikazana na slici 4.12. Testiranje predložene temperaturne sonde izvršeno je na PV elektrani, što se može videti sa slike 4.18.

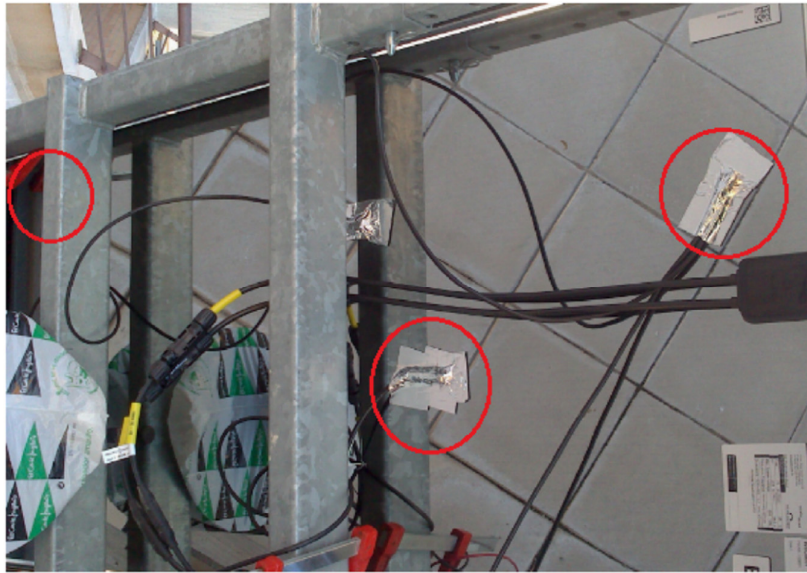


Slika 4.18 Modifikovani temperaturni sistem u radu [71] tokom upotrebe

Nažalost, u ovom radu autori nisu vršili proveru tačnosti realizovane sonde, odnosno njenu kalibraciju u izotermalnim uslovima, kao u prethodnom radu. Osim toga, u radu nisu dati nikakvi rezultati merenja temperaturne sonde i autori nisu naglasili da li su koristili

referentne instrumente za validaciju dobijenih merenja. Na osnovu navedenog, može se zaključiti da istraživanje predstavljeno u radu [71] nije u potpunosti kompletno.

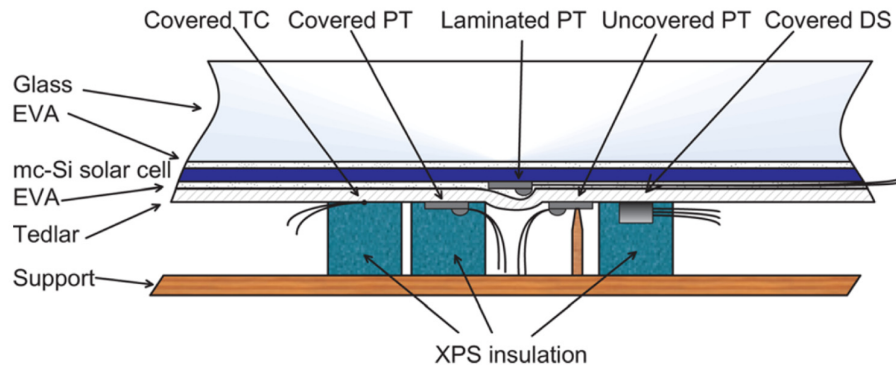
Dva prethodno opisana istraživanja ipak uključuju preko potrebnu termičku izolaciju temperaturnog senzora i kao takva predstavljaju redak slučaj. Mnogo je više istraživanja koja uopšte ne uključuju termičku izolaciju temperaturnog senzora, kao što je to slučaj sa istraživanjem predloženim u radu [72], gde je nekoliko senzora DS18B20 montirano na PV modul samolepljivom aluminijumskom trakom, koja ujedno predstavlja njihovu jedinu termičku izolaciju, a što se može videti sa slike 4.19.



Slika 4.19 Način montaže temperaturnog senzora DS18B20 u radu [72]

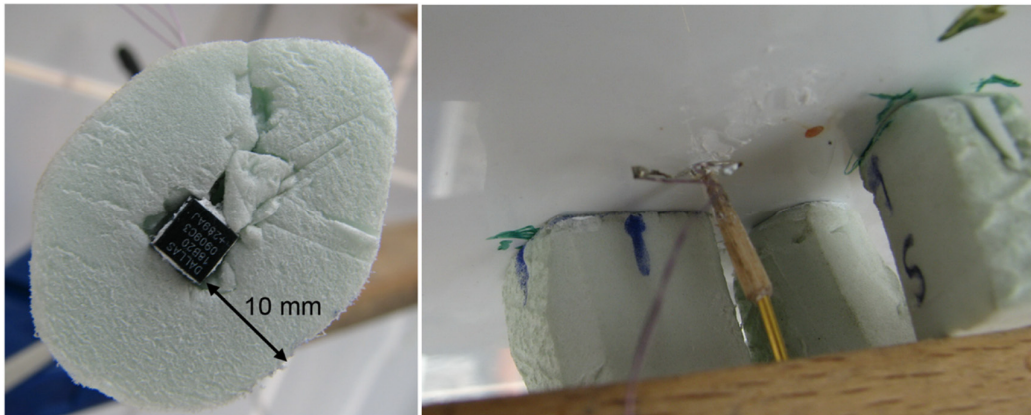
4.4 Rešenja sa termičkom izolacijom temperaturnih senzora

Istraživanje prikazano u radu [73] predstavlja uporednu analizu tri tipa senzora u procesu merenja temperature PV modula. Naime, implementirano je pet Pt1000 senzora klase B, jedan termopar i jedan DS18B20 senzor. Tri Pt1000 senzora su laminirana ispod sloja tedlara i mere temperaturu direktno na poleđini PV ćelija, drugi Pt1000 je postavljen na tedlar tako što ga podupire mala drvena letvica, a ostali senzori su termički izolovani blokom stiropora debljine 10 mm i visine 30 mm. Na slici 4.20 prikazan je način montaže pojedinih temperaturnih senzora na PV modul [73].



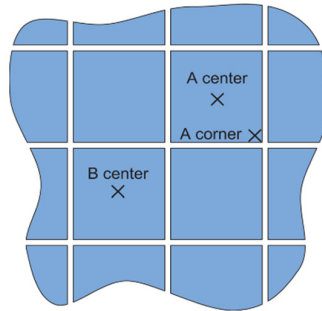
Slika 4.20 Način montaže temperaturnih senzora na PV modul u radu [73]

Autori su se odlučili da blokove stiropora ne lepe za poledinu PV modula, već su fiksirani pomoću daske, kao što je prikazano na slikama 4.20 i 4.21. Ovo znači da su spojevi između tedlara i stiropora u izvesnoj meri otvoreni, jer je površina stiropora neravna. Osim toga, očigledno je da ni temperaturni senzori nisu zalepljeni za tedlar, već se njihovo fiksiranje na PV modul vrši pomoću bloka stiropora koji ih pritiska sa zadnje strane. Nažalost, ovako improvizovano povezivanje senzora na PV modul nije baš čvrsto i lako se može desiti da temperaturni senzor ne ostvaruje dobar termički kontakt sa PV modulom.



Slika 4.21 Povezivanje temperaturnih senzora na PV modul u radu [73]

Važno je naglasiti da autori nisu naveli pomoću kojih instrumenata su očitavali merenja sa Pt1000 senzora, dok je za kompenzaciju hladne tačke kod termopara iskorišćen dodatni DS18B20 senzor. Tri laminirana Pt1000 senzora su raspoređena kao što je prikazano na slici 4.22.

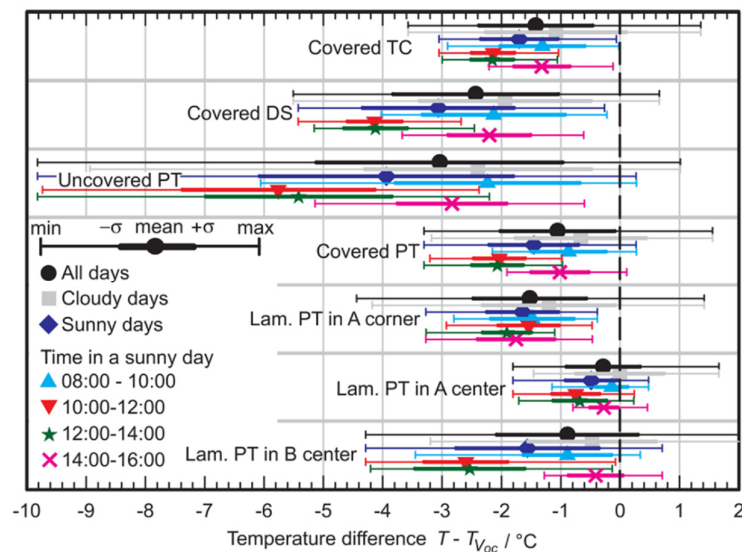


Slika 4.22 Raspored laminiranih senzora u radu [73]

Svi termički izolovani senzori grupisani su na PV ćeliji A, usled čega je njena temperatura za nekih 1°C veća u odnosu na PV ćeliju B. Osim toga, blokovi stiropora utiču na distribuciju toplote i na samoj PV ćeliji A, tako što je centralni deo, na kome su blokovi stiropora grupisani, topliji od uglova za skoro 3°C .

Autori nisu koristili referentne instrumente, već su referentna merenja temperature dobili pomoću napona otvorenog kola ćelije A. Da bi se temperatura PV ćelije merila na ovaj način neophodno je poznavanje vrednosti nekoliko parametara koje proizvođači obično ne publikuju. Pored toga, merenja temperature dobijena ovom metodom su validna isključivo kada je intenzitet Sunčeve svetlosti iznad 200 W/m^2 , što su autori uzeli u obzir.

Rezultati eksperimenta sprovedenog tokom više dana u različitim uslovima rada su prikazani kao razlika između uporednih merenja dobijenih sa temperaturnih senzora i napona otvorenog kola. Rezultati testiranja prikazani su na slici 4.23.



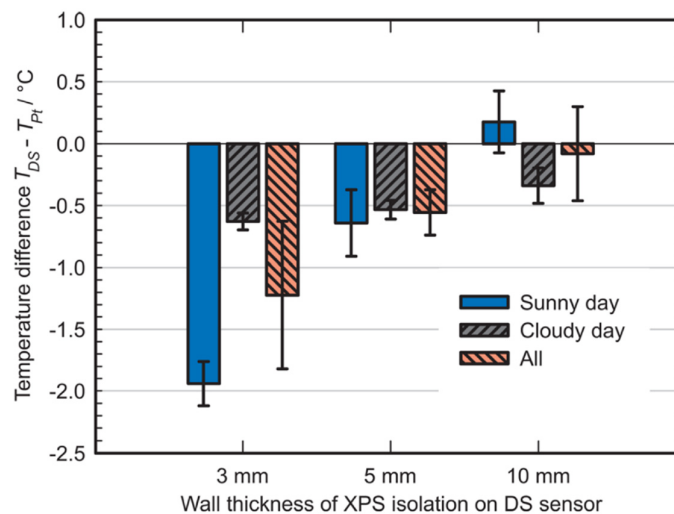
Slika 4.23 Rezultati testiranja u radu [73]

Kao što se može videti sa slike 4.23 najtačnija merenja dobijena su pomoću Pt1000 senzora laminiranog na sredini PV ćelije A, dok laminirani Pt1000 senzor smešten u uglu PV ćelije A beleži nešto niža merenja u odnosu na referentna, što se može pripisati nižoj temperaturi PV ćelije A na uglovima, iz prethodno opisanih razloga. Iz istih razloga su merenja Pt1000 senzora laminiranog u centru PV ćelije B niža u odnosu na uporedna merenja.

Tačnost merenja dobijenih pomoću termički izolovanog Pt1000 senzora i termopara je nešto niža u odnosu na uporedna merenja dobijena pomoću laminiranog Pt1000 senzora smeštenog u centru PV ćelije A. Međutim, merenja dobijena pomoću termički izolovanog Pt1000 senzora i termopara su malo tačnija u odnosu na uporedna merenja dobijena pomoću laminiranog Pt1000 senzora smeštenog u centru PV ćelije B. Nešto niže vrednosti tokom merenja dobijene su pomoću termički izolovanog senzora DS18B20, što je donekle i očekivano zbog njegove veličine koja ga čini osetljivijim na uticaj ambijentalne temperature.

Sasvim očekivano, najmanje tačna merenja dobijena su sa termički neizolovanog Pt1000 senzora koji je bio izložen uticaju ambijentalne temperature.

Kako bi povećali tačnost merenja senzora DS18B20, autori su eksperimentisali sa blokovima stiropora različitih debljina i to: 3 mm, 5 mm i 10 mm. U ovom eksperimentu referentna merenja su dobijena pomoću termički izolovanog Pt1000 senzora. Rezultati ovog eksperimenta u formi razlike između uporednih merenja prikazani su na slici 4.24.



Slika 4.24 Uticaj debljine stiropora na tačnost merenja u radu [73]

Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih na slici 4.24 evidentno je da su najtačnija merenja dobijena kada je senzor DS18B20 termički izolovan pomoću bloka stiropora debljine 10 mm.

Istraživanja prikazana u ovom radu su izuzetno korisna jer potkrepljuju teoriju da tačnost merenja zavisi od toga da li je temperaturni senzor izolovan, kao i od kvaliteta izolacije. Ukoliko se bitan faktor poput ovoga ignoriše, kao što je to učinjeno u radu [67], ili se ne analizira na odgovarajući način, kao što je to učinjeno u radu [69], tačnost merenja neće biti zadovoljavajuća.

Nažalost, u ovom radu montaža stiropora na PV modul nije baš najbolje izvedena, što donekle objašnjava nešto niže vrednosti merenja u odnosu na uporedna referentna merenja.

5. PROJEKTOVANJE I REALIZACIJA SOPSTVENIH SISTEMA ZA MERENJE TEMPERATURE PV MODULA

U cilju povećanja tačnosti merenja temperature PV modula pristupilo se realizaciji odgovarajućih mernih sistema kojima bi se proverila tačnost merenja nekih trenutno korišćenih, a najreprezentativnijih, rešenja i eventualno izvršila određena poboljšanja u cilju povećanja tačnosti merenja. Osim toga, pristupilo se realizaciji sopstvenog rešenja čija će tačnost merenja nadmašiti tačnost merenja trenutno korišćenih rešenja. U daljem tekstu biće opisana funkcionalnost realizovanih sistema i dobijeni merni rezultati.

5.1 Sistem zasnovan na RTF senzoru

Kao što je već naglašeno, Pt100 senzori predstavljaju najčešće korišćeni tip senzora za merenje temperature PV modula. U radu [69], ulogu referentnog senzora ima samolepljivi temperaturni senzor RTF4, koji zapravo predstavlja Pt100 senzor klase tačnosti B obmotan silikonskim gumenim omotačem, a koji se može videti na slici 5.1 [66]. Iako se radi o relativno skupom rešenju, navedeni senzor ima veliku primenu u merenju temperature PV modula kao osnovni i kao referentni senzor [69].



Slika 5.1 Temperaturni senzor RTF4 [66]

Bitnu prednost ovog senzora predstavlja mogućnost četvorožičnog merenja otpornosti, čime se omogućavaju najtačnija merenja. S obzirom na njegovu veliku upotrebu, kao i tačnost

njegovih merenja, odlučeno je da se navedeni senzor koristi kao referentni senzor prilikom realizacije sopstvenih rešenja. Kako bi merenja dobijena pomoću ovog senzora bila što pouzdanija, odlučeno je da njihovu akviziciju obavlja multimetar visoke tačnosti Keysight 34410A, pomoću funkcije temperaturnog merenja koja direktno prikazuje vrednost izmerene temperature u °C.

Kako bi sprovedeno istraživanje bilo potpuno i nedvosmisleno, neophodno je izvršiti proveru tačnosti merenja senzora RTF4 tokom merenja temperature PV modula pomoću referentnog instrumenta visoke klase. U tu svrhu iskorišćena je termovizijska kamera Jenoptik Varioscan 3021ST (slika 5.2), čija osetljivost iznosi $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$, a tačnost merenja $\pm 2\%$. Važno je naglasiti da ni u jednom dostupnom istraživanju nije korišćen ovako kvalitetan referentni instrument.



Slika 5.2 Termovizijska kamera Jenoptik Varioscan 3021ST

Emisivnost predmeta, čija se temperatura meri termovizijskom kamerom, je od presudnog značaja za tačnost samih merenja. Pozadina PV modula napravljena je od belog tedlara čija se emisivnost u literaturi kreće oko vrednosti 0.87. Međutim, u radu [74] eksperimentalnim putem je dobijena vrednost od 0.85, tako da je termovizijska kamera Varioscan 3021ST podešena na ovu vrednost. Termovizijske slike merenja obrađene su u softveru Irbis Professional koji omogućava informaciju o izmerenoj temperaturi predmeta na svakom pikselu termovizijske slike.

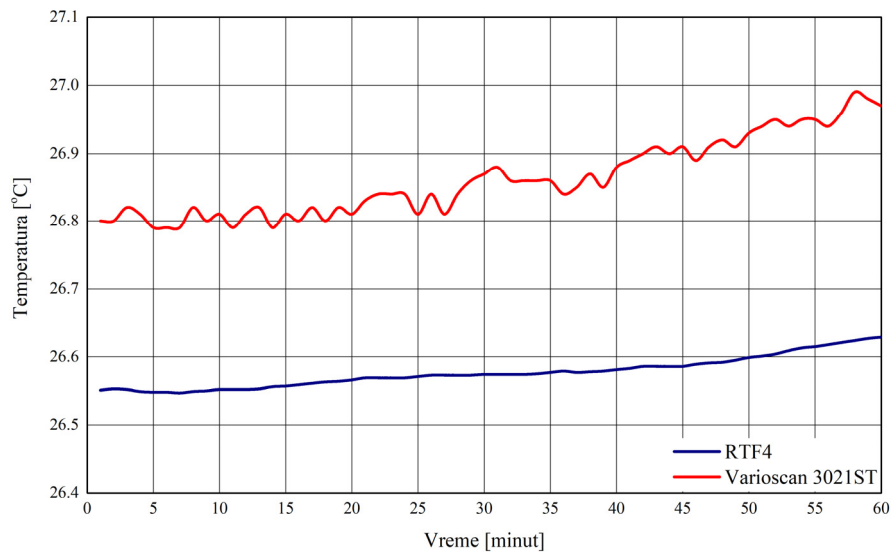
Testiranje senzora RTF4 obavljeno je na PV modulu u dve faze:

- U laboratoriji pod izotermalnim uslovima,
- Na otvorenom prostoru u realnim uslovima rada.

U realnosti, kada PV modul nije izložen Sunčevoj svetlosti, npr. kada je oblačno, njegova temperatura je približna ambijentalnoj temperaturi. Pod ovim uslovima se može smatrati da je PV modul u izotermalnim uslovima i tada je tačnost temperaturnog senzora, upotrebljenog za merenje temperature PV modula, najveća.

Kako bi se utvrdilo da li uopšte ima smisla testirati određeni temperaturni senzor u realnim uslovima rada, neophodno je da se utvrdi tačnost njegovih merenja u izotermalnim uslovima. Upravo to je svrha laboratorijskog testiranja sprovedenog na PV modulu koji nije bio izložen Sunčevim zracima, tako što se nalazio u zamračenoj laboratoriji.

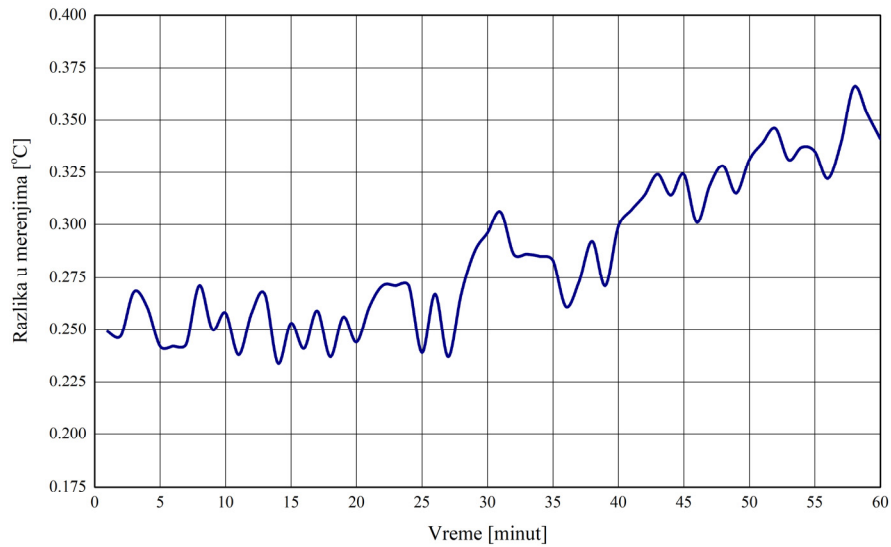
Tokom laboratorijskog testiranja, merenja su obavljena svakog minuta tokom jednog sata i to simultano sa senzora RTF4, pomoću multimetra Keysight 34410A, i termovizijske kamere Varioscan 3021ST. Nažalost, svako testiranje termovizijskom kamerom je vremenski ograničeno, tj. ne može se sprovoditi u dužem vremenskom intervalu usled ograničenja koja nameću memorijski kapacitet i kapacitet raspoloživih baterija kojima se termovizijska kamera napaja. Rezultati ovog testiranja su prikazani na slici 5.3.



Slika 5.3 Rezultati laboratorijskog testiranja senzora RTF4

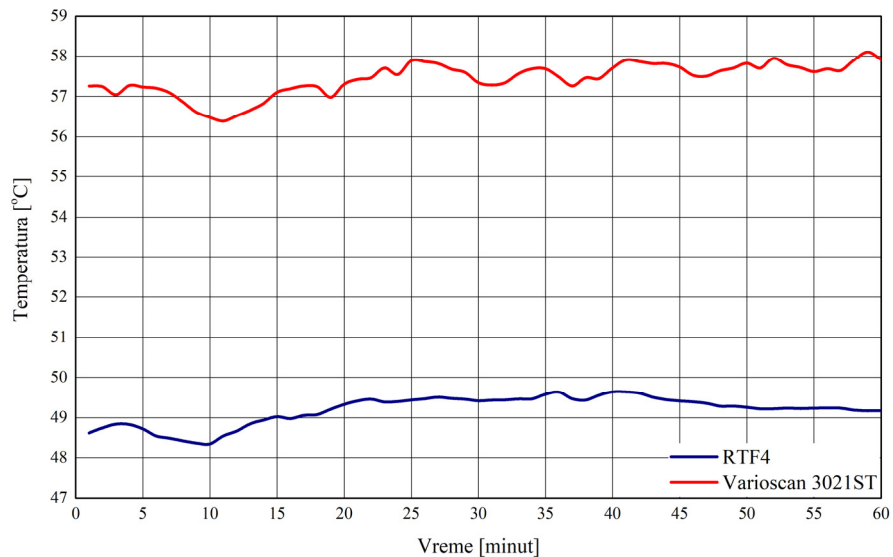
Sa slike 5.3 se jasno uočava da su vrednosti merenja senzora RTF4 nešto niže u odnosu na uporedna merenja sa termovizijske kamere Varioscan 3021ST i da su znatno ravnija u odnosu na njih. Tačna razlika između uporednih merenja je prikazana na slici 5.4.

Sa slike 5.4 može se zapaziti da je razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja manja od 0.4°C , što je dovoljno da se pristupi testiranju temperaturnog senzora RTF4 u realnim uslovima rada.



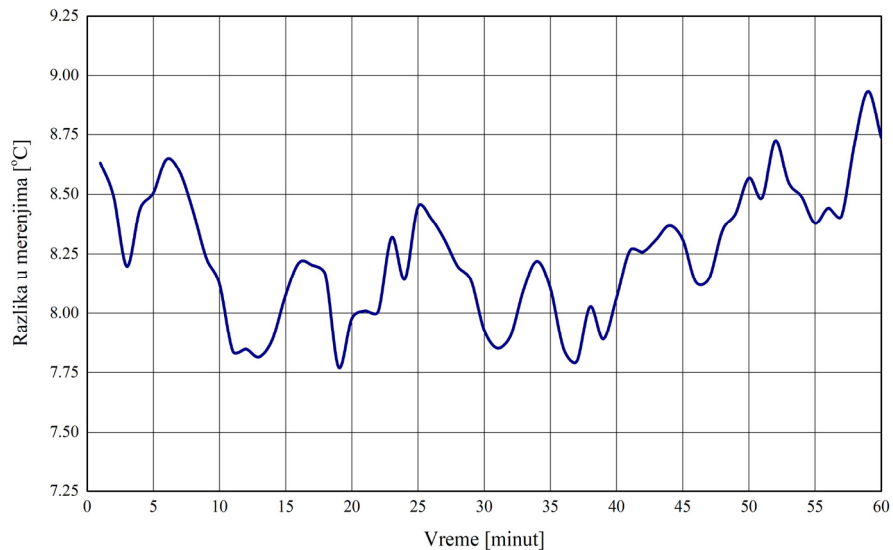
Slika 5.4 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja senzora RTF4

Testiranje u realnim uslovima rada izvršeno je na istom PV modulu, koji je za razliku od laboratorijskog testiranja ovaj put izložen direktnom Sunčevom zračenju i ambijentalnom uticaju tokom celog letnjeg dana. Rezultati jednočasovnog testiranja u realnim uslovima, tokom koga je ambijentalna temperatura u najtoplijem delu dana bila 28°C, prikazani su na slici 5.5.



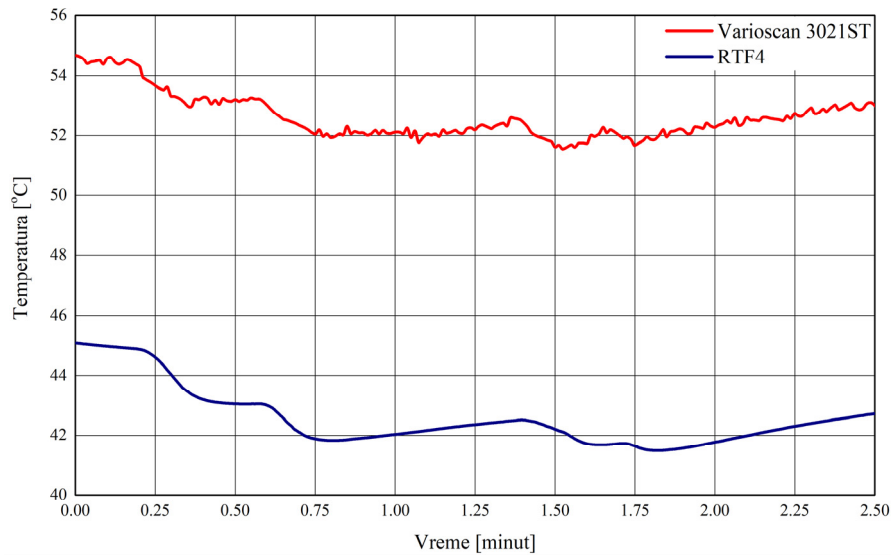
Slika 5.5 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada senzora RTF4

Na osnovu slike 5.5 evidentno je da se razlika između uporednih merenja drastično povećala, a tačna razlika između njih prikazana je na slici 5.6. Merenja prikazana na slici 5.5 odabrana su za analizu jer ambijentalna temperatura tokom leta na teritoriji grada Niša, gde su merenja izvršena, najčešće uveliko premašuje temperaturu od 28°C, pa se tako merenja temperature PV modula prikazana na slici 5.5 mogu svrstati u red nižih vrednosti temperatura PV modula koje se mogu zabeležiti u letnjim mesecima na teritoriji grada Niša.



Slika 5.6 Razlika između uporednih merenja testiranja u realnim uslovima rada senzora RTF4

Razlika od gotovo 9°C između uporednih merenja temperaturnog senzora RTF4 i termovizijske kamere Varioscanner 3021ST je izuzetno velika i ima tendenciju daljnje povećanja sa porastom razlike između temperature PV modula i ambijentalne temperature. Prikazana merna greška temperaturnog senzora Pt100 potiče isključivo od neadekvatne, odnosno nedovoljne termičke izolacije koju mu pruža silikonski gumeni omotač. U slučaju kada je temperatura PV modula dosta veća od ambijentalne temperature, silikonski gumeni omotač zapravo ima ulogu hladnjaka temperaturnog senzora Pt100. Dakle, iz navedenog se lako može zaključiti da je temperaturni senzor RTF4 podložan uticaju ambijentalne temperature, a samim tim i uticaju vetra usmerenog direktno na senzor. Eksperimentalna potvrda ove konstatacije demonstrirana je merenjima prikazanim na slici 5.7.



Slika 5.7 Uticaj vetra na tačnost merenja senzora RTF4

Sa slike 5.7 može se uočiti da je pad temperature PV modula koji beleži senzor RTF4 veći od pada temperature koji beleži termovizijska kamera Varioscan 3021ST.

Logičan zaključak iz svega navedenog je da temperaturni senzor RTF4 nije pogodan za tačno merenje temperature PV modula, jer tačnost njegovih merenja u velikoj meri zavisi od razlike između ambijentalne temperature i temperature PV modula. Naime, što je ova razlika veća, biće veća i greška merenja temperaturnog senzora RTF4.

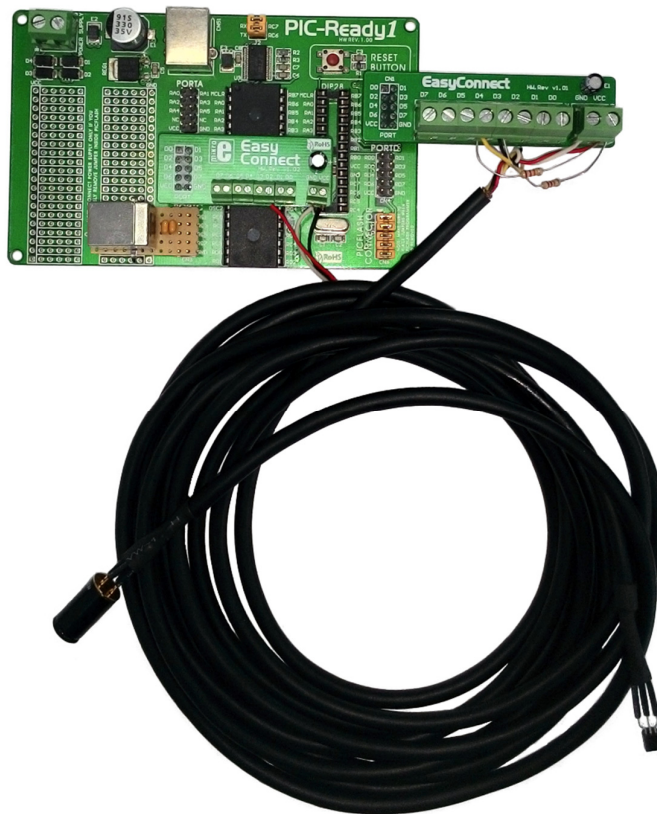
Prikazanim eksperimentalnim rezultatima ukazuje se na nedovoljnu tačnost merenja temperaturnog senzora RTF4 pri merenju temperature PV modula. Iako su merenja ugrađenog temperaturnog senzora Pt100 apsolutno tačna, njegova neadekvatna termička izolacija prouzrokuje veliku mernu grešku koja se može detektovati ili proračunom temperature pomoću napona otvorenog kola, kao što je prikazano u poglavlju 4.4, odnosno u radu [73], ili upotrebom adekvatnog referentnog instrumenta poput termovizijske kamere ili instrumenta zasnovanog na kontaktnom senzoru sa odgovarajućim stepenom termičke izolacije.

Sagledavajući prethodno opisane nedostatke odustalo se od inicijalne namere po kojoj je temperaturni senzor RTF4 trebao imati ulogu referentnog senzora. Umesto toga je odlučeno da termovizijska kamera Jenoptik Varioscan 3021ST bude korišćena kao referentni instrument u svim testovima realizovanih sopstvenih rešenja za merenje temperature PV modula.

5.2 Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru DS18B20

Zahvaljujući svojim prednostima, digitalni temperaturni senzor DS18B20 je izuzetno praktičan i ima veliku primenu u raznovrsnim rešenjima. Pored veoma dobre tačnosti merenja, ovaj senzor odlikuje mogućnost povezivanja na MCU pomoću para provodnika dugačkih čak nekoliko stotina metara. Kao što je prikazano u radu [69], jedna od njegovih primena može biti i u merenju temperature PV modula. Iako je u prethodnom poglavlju navedeno da su merenja realizovanog rešenja zasnovanog na ovom senzoru nedovoljno tačna, to ne umanjuje njegovu mogućnost primene za merenje temperature PV modula ukoliko se izvrši poboljšanje njegove termičke izolacije, npr. blokom stiropora, kao što je prikazano u radu [73].

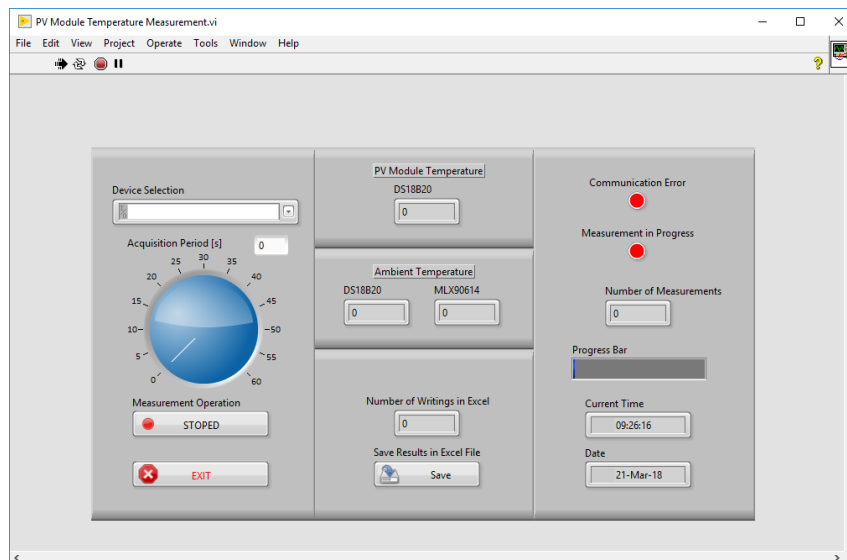
Kako bi se proverila mogućnost merenja temperature PV modula senzorom DS18B20, razvijen je sopstveni sistem zasnovan na MCU-u PIC18F4550, na koji je senzor povezan putem 1-wire komunikacije. Rad realizovanog sistema se zasniva na upotrebi PC-a sa kojim realizovani sistem komunicira putem ugrađene USB HID (engl. Universal Serial Bus Human Interface Device) komunikacije [75]. Izgled realizovanog sistema prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8 Izgled realizovanog sistema sa senzorom DS18B20

Kao što se može videti sa slike 5.8, senzor DS18B20 je na MCU PIC18F4550 povezan pomoću savitljivog, licnastog kabla dužine 2 m, kako bi se olakšala njegoa montaža na PV modul.

Realizovani sistem radi tako što virtuelni instrument, realizovan u LabVIEW-u i instaliran na PC računaru, najpre izdaje MCU-u komandu za akviziciju merenja sa temperaturnog senzora DS18B20. Nakon što MCU dobije rezultate merenja, prosleđuje ih PC računaru. Zatim virtuelni instrument vrši obradu rezultata merenja i njihov prikaz u odgovarajućem polju prozora. Ukoliko je odgovarajuća opcija aktivirana, rezultati merenja smeštaju se na hard disk računara (engl. Hard Drive Disk – HDD) u formi Excel fajla zajedno sa vremenom merenja. Naziv Excel fajla predstavlja datum kada se merenja vrše, pa tako svaki novi dan ima sopstveni fajl u koji se smeštaju dobijena merenja. Osim navedenog, virtuelni instrument omogućava podešavanje vremenskog razmaka između dva merenja. Izgled prozora realizovanog virtuelnog instrumenta je prikazan na slici 5.9.



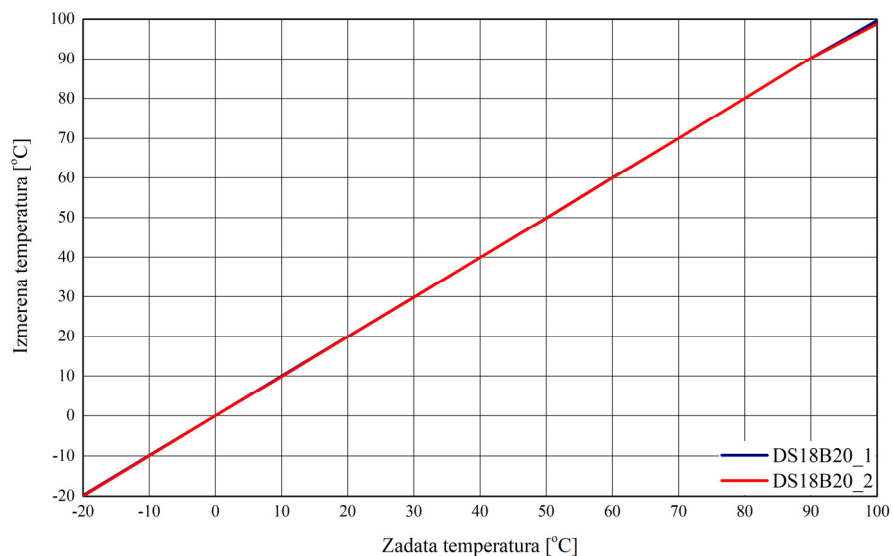
Slika 5.9 Izgled prozora realizovanog virtuelnog instrumenta

Kao što je napomenuto, temperaturni senzor DS18B20 je fabrički kalibrisan i ima tačnost od $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, a rezolucija merenja iznosi 0.0625°C . S obzirom da svaki senzor ima izvesna odstupanja u pogledu tačnosti merenja, izvršeno je uporedno testiranje dva senzora DS18B20 pomoću temperaturnog kalibratora Fluke 9103, u temperaturnom opsegu od -20°C do 100°C , sa ciljem da se u realizovani sistem implementira tačniji senzor. Izgled ove merne postavke prikazan je na slici 5.10.



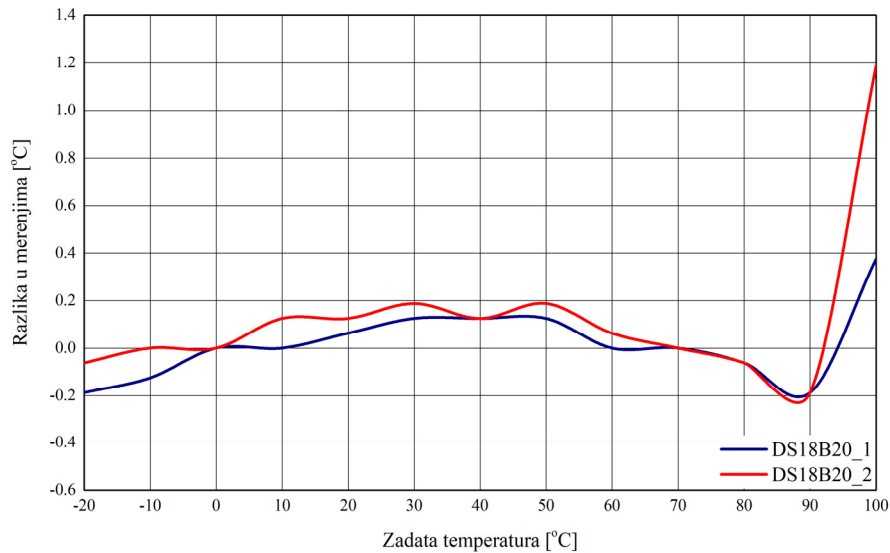
Slika 5.10 Merna postavka provere tačnosti merenja dva senzora DS18B20

Rezultati dobijeni prethodno opisanim eksperimentom provere tačnosti merenja dva temperaturna senzora DS18B20 prikazani su na slici 5.11.



Slika 5.11 Rezultati provere tačnosti merenja dva senzora DS18B20

Prikazani rezultati pokazuju odlično poklapanje merenja oba DS18B20 senzora sa zadatom temperaturom u temperaturnom kalibratoru Fluke 9103, a tačna razlika između uporednih merenja oba senzora i zadate temperature prikazana je na slici 5.12.



Slika 5.12 Razlika između uporednih merenja dva senzora DS18B20 za zadatu temperaturu

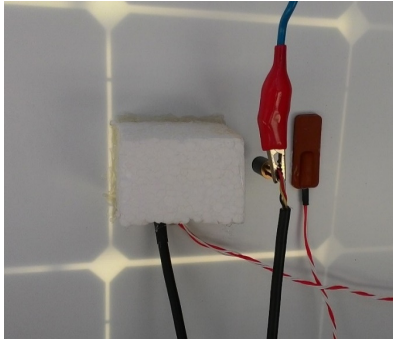
Razlika između uporednih merenja oba temperaturna senzora DS18B20 za zadatu temperaturu u temperaturnom kalibratoru Fluke 9103 nedvosmisleno ukazuje na izuzetnu tačnost oba senzora DS18B20, pri čemu je merenje prvog senzora dosta tačnije od merenja drugog senzora na temperaturi od 100°C. Imajući u vidu nešto bolju tačnost prvog senzora DS18B20, izvršena je njegova implementacija u realizovanom sistemu.

Kao što je već naglašeno, u cilju postizanja što veće tačnosti merenja neophodno je izvršiti termičku izolaciju senzora DS18B20. Termička izolacija stiroporom prikazana u radu [73] predstavlja ekonomično rešenje, pa je odlučeno da se senzor DS18B20 izoluje na isti način, tj. blokom stiropora debljine 10 mm i dužine 30 mm. Međutim, za razliku od istraživanja prikazanog u radu [73], gde je blok stiropora pričvršćen daskom, i na taj način ujedno ostvaruje kontakt između PV modula i temperaturnog senzora DS18B20, mnogo bolje rešenje predstavlja montaža temperaturnog senzora DS18B20 na PV modul lepljenjem pomoću dvostrane samolepljive termo trake, a da se pri tome blok stiropora zalepi na PV modul pomoću topljive plastike. Na ovaj način bi se ujedno izvršilo zatvaranje svih mogućih otvora kroz koje ambijentalna temperatura može da deluje na temperaturni senzor DS18B20, odnosno da utiče na tačnost njegovih merenja. Izgled merne postavke i montiranih senzora na PV modul je prikazan na slici 5.13.

Testiranje realizovanog sistema izvedeno je u dve faze:

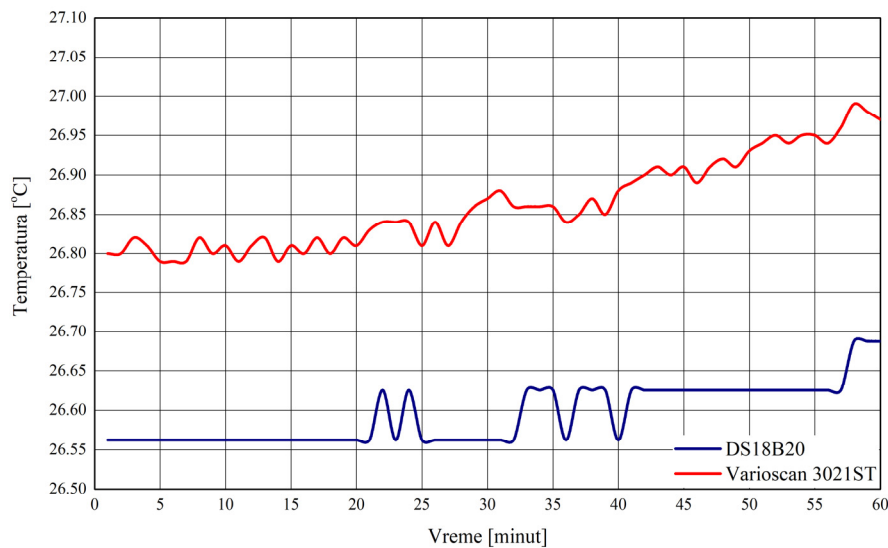
- U laboratoriji pod izotermalnim uslovima,
- Na otvorenom prostoru u realnim uslovima rada.

Validacija rezultata merenja realizovanog sistema u obe faze testiranja izvršena je pomoću termovizijske kamere Varioscan 3021ST, čija je emisivnost podešena na 0.85.



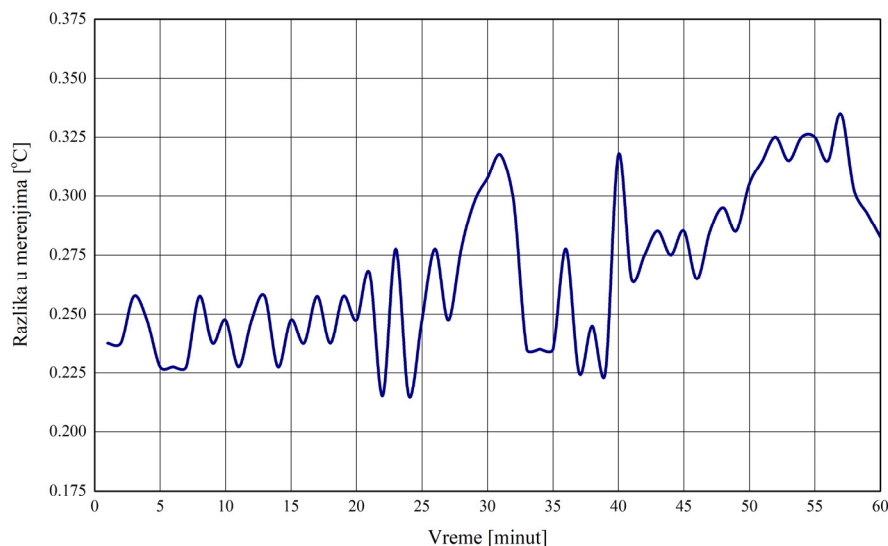
Slika 5.13 Montaža temperaturnog senzora DS18B20 na PV modul

Tokom laboratorijskog testiranja vršeno je eksperimentisanje sa montažom stiropora na PV modul. Utvrđeno je da ponovljivost rezultata merenja najviše zavisi od dimenzija stiropora i od toga koliko je isti dobro zalepljen na PV modul, tj. da li su zatvoreni svi procepi kroz koje bi vazduh mogao da dopre do temperaturnog senzora DS18B20 i prouzrokuje mernu grešku. Rezultati jednočasovnog laboratorijskog testiranja, tokom koga su merenja vršena na svaki minut, prikazani su na slici 5.14.



Slika 5.14 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20

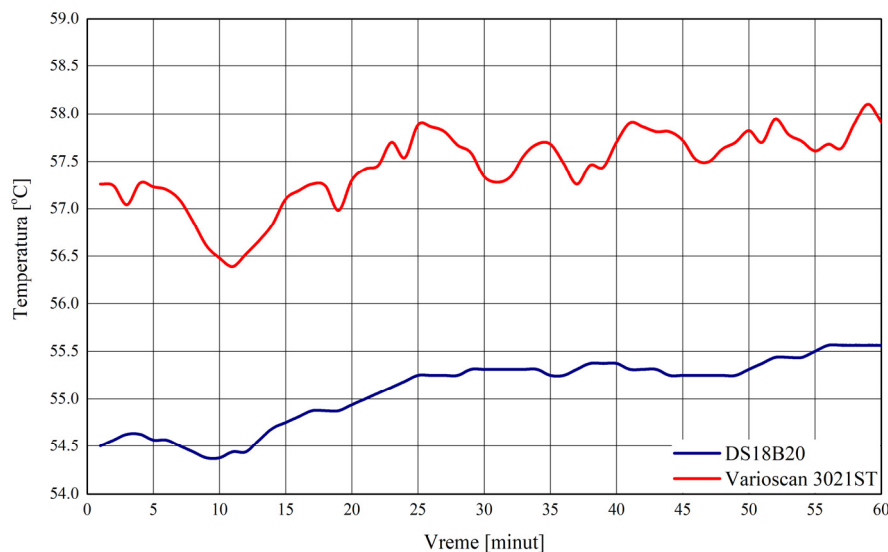
Na slici 5.15 prikazana je razlika između uporednih merenja realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST tokom laboratorijskog testiranja.



Slika 5.15 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20

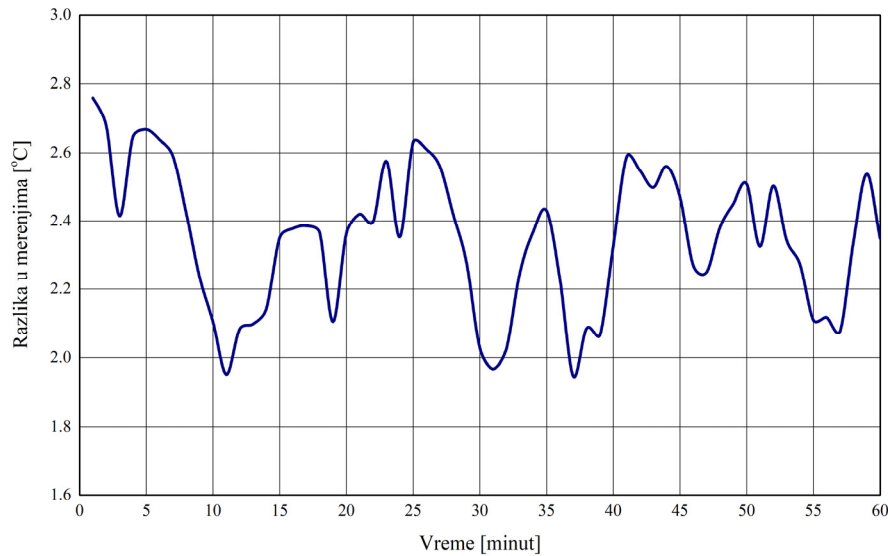
Razlika između uporednih merenja manja je od 0.35°C , što predstavlja vrednost u rangu merenja temperaturnog senzora RTF4, tj. u rangu merenja prikazanih na slici 5.4.

Nakon laboratorijskog testiranja realizovanog sistema izvršeno je njegovo testiranje u realnim uslovima rada na istom PV modulu, po prethodno opisanoj proceduri. Rezultati jednočasovnog testiranja u realnim uslovima rada prikazani su na slici 5.16.



Slika 5.16 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20

Na slici 5.17 prikazana je razlika između uporednih merenja realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscans 3021ST tokom testiranja u realnim uslovima rada.



Slika 5.17 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20

Razlika između uporednih merenja od približno 2.8°C definitivno pokazuje da merenja predstavljena u radu [69] nisu validna, prvenstveno jer temperaturna sonda, bazirana na temperaturnom senzoru DS18B20, tu nije adekvatno termički izolovana. Dodatno, poređenjem merenja prikazanih na slikama 5.6 i 5.17 nedvosmisleno se uočava veća tačnost merenja temperaturnog senzora DS18B20 termički izolovanog pomoću bloka stiropora, a razlika između ovih merenja iznosi 6°C .

Međutim, na osnovu razlike između uporednih merenja tokom testiranja u realnim uslovima rada može se zaključiti da oblik kućišta TO-92 temperaturnog senzora DS18B20 smanjuje tačnost merenja temperature PV modula, jer veći deo njegove površine ne može biti priljubljen uz PV modul, pa se zato na njemu javlja termalni gradijent.

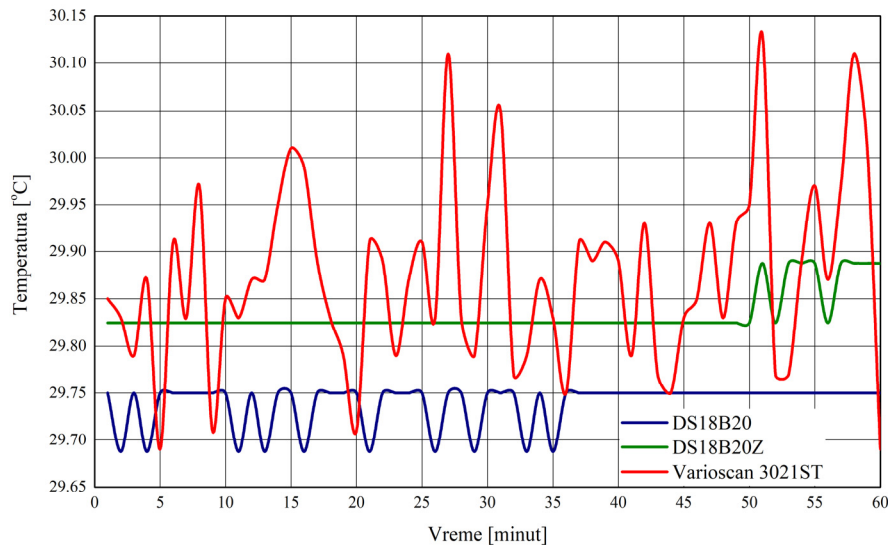
5.3 Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru DS18B20Z

U zavisnosti od tipa kućišta senzora, temperaturni senzor DS18B20 se isporučuje u tri varijante i to: SO-8, $\mu\text{SOP-8}$ i TO-92. Neophodno je naglasiti da se u prodaji, kao i u primeni, najčešće sreće TO-92 varijanta, koja je ujedno i korišćena u radovima [69, 71]. Obzirom na to da se montaža temperaturnog senzora DS18B20 na PV modul izvodi preko ravnog dela

kućišta TO-92, koje ujedno ima manju površinu u odnosu na neravni deo kućišta, evidentno je da je veći deo kućišta izložen ambijentalnom uticaju, što bitno utiče na tačnost merenja. Bolje rešenje predstavlja primena temperaturnog senzora DS18B20Z u SO-8 varijanti kućišta, jer će u tom slučaju veći deo kućišta biti u kontaktu sa PV modulom, tj. manji deo kućišta biće izložen ambijentalnim uslovima, pa je očekivano da greška merenja bude nešto niža u odnosu na temperaturni senzor DS18B20 u TO-92 varijanti kućišta.

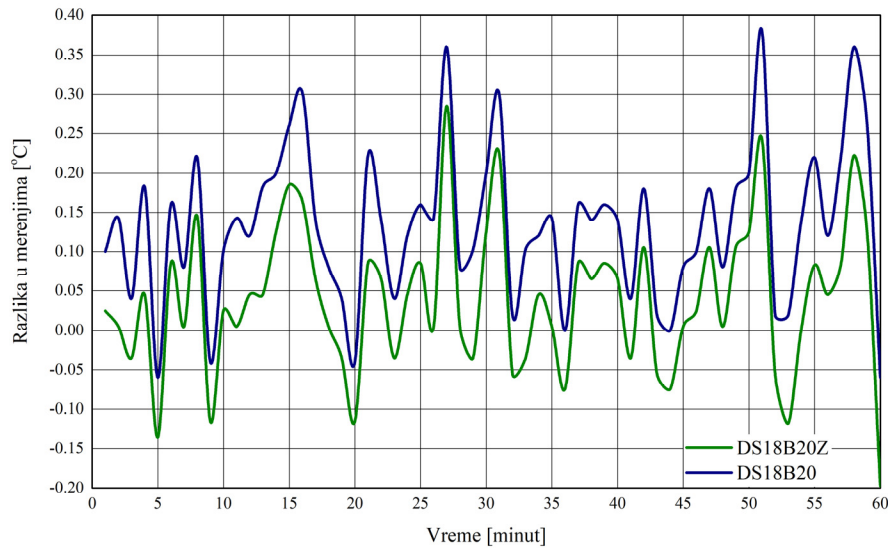
Potvrda tačnosti navedene pretpostavke izvršena je eksperimentalnim putem. Drugim rečima, sistemu prikazanom na slici 5.8 pridodat je temperaturni senzor DS18B20Z tako da vrši simultana merenja sa temperaturnim senzorom DS18B20. Montaža i izolacija oba temperaturna senzora izvedena je pomoću identičnog bloka stiropora kao i u prethodnom slučaju, odnosno lepljenjem stiropora na PV modul vrućom plastikom.

Kao i u slučaju prethodnih temperaturnih senzora, eksperimenti su najpre vršeni u laboratorijskim uslovima, odnosno pri izotermalnim uslovima. Rezultati jednočasovnog laboratorijskog testiranja tokom koga su merenja vršena na svaki minut prikazani su na slici 5.18. U cilju što bolje analize tačnosti merenja temperaturnog senzora DS18B20Z izvršeno je poređenje njegovih merenja sa uporednim merenjima dobijenim temperaturnim senzorom DS18B20 i termovizijskom kamerom Varioscan 3021ST.



Slika 5.18 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z

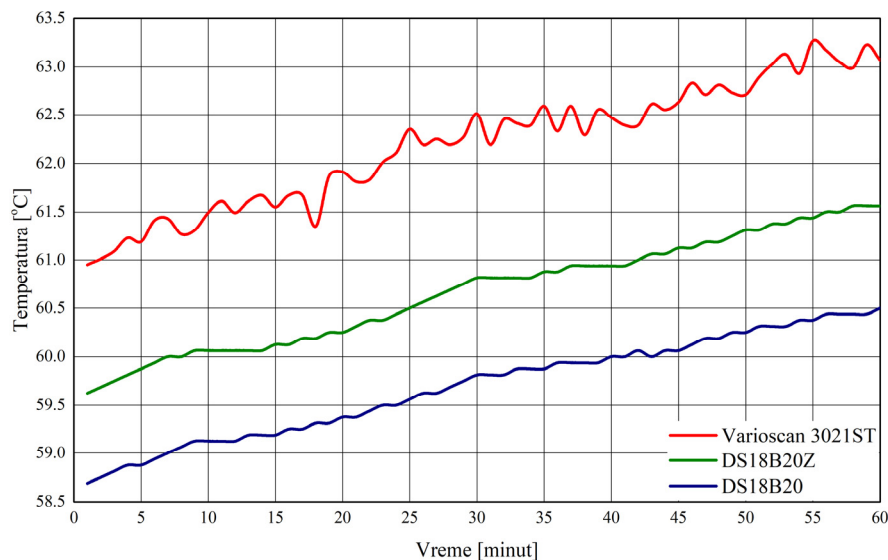
Na slici 5.19 prikazana je razlika između uporednih merenja temperaturnih senzora DS18B20 i DS18B20Z, i termovizijske kamere Varioscan 3021ST.



Slika 5.19 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z

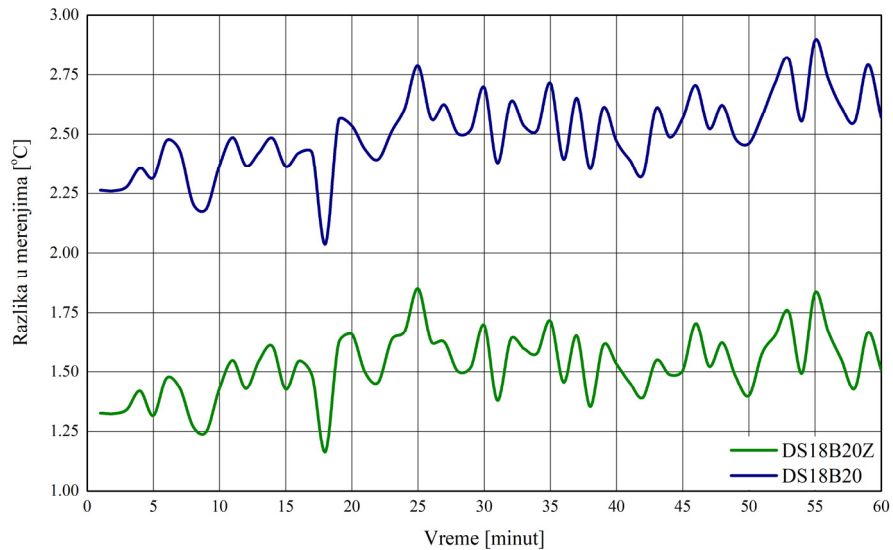
Kao što se može videti sa slike 5.19, razlika između uporednih merenja u slučaju temperaturnog senzora DS18B20 je manja od $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, dok je razlika između uporednih merenja u slučaju temperaturnog senzora DS18B20Z nešto manja i iznosi $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$.

Nakon laboratorijskog testiranja izvršeno je testiranje u realnim uslovima rada. Rezultati jednočasovnog testiranja prikazani su na slici 5.20.



Slika 5.20 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z

Na slici 5.21 prikazana je razlika između uporednih merenja temperaturnih senzora DS18B20 i DS18B20Z, i termovizijske kamere Varioscan 3021ST.



Slika 5.21 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru DS18B20Z

Temperatura izmerena na PV modulu tokom ovog eksperimenta može se svrstati u red ekstremnih i samim tim je očekivano da razlika između uporednih merenja bude veoma velika. Na osnovu razlike između uporednih merenja može se zaključiti da oblik kućišta temperaturnog senzora DS18B20 ima značajan uticaj na tačnost merenja temperature PV modula. Naime, merenja dobijena temperaturnim senzorom DS18B20Z su gotovo dva puta tačnija u odnosu na merenja dobijena temperaturnim senzorom DS18B20, jer veći deo njegovog kućišta nije u direktnom kontaktu sa PV modulom, usled čega se na njemu javlja značajan termalni gradijent.

5.4 Temperaturna sonda bazirana na temperaturnom senzoru DS18B20

Iako rezultati merenja prikazani u poglavlju 5.1 ukazuju da merenja izvršena temperaturnom sondom prikazanom u radu [69] nisu tačna, jer merenja referentnog temperaturnog senzora RTF4 nisu tačna, potrebno je nedvosmisleno ispitati ovu činjenicu. U tu svrhu neophodno je realizovati sopstvenu temperaturnu sondu sa boljim stepenom termičke izolacije nego što je ima temperaturna sonda prikazana u radu [69].

U cilju što boljeg poređenja rezultata, realizovana temperaturna sonda je zasnovana na istom temperaturnom senzoru, tj. senzoru DS18B20 u TO-92 kućištu. Realizacija je izvršena tako što je na vrhu otvorene plastične kutije dimenzija 17x17x13 mm montiran temperaturni senzor DS18B20, tako da je njegova glatka površina u ravni sa otvorom plastične kutije. Nakon odgovarajuće montaže i fiksiranja (pričvršćivanja) temperaturnog senzora DS18B20, neophodno je izvršiti punjenje plastične kutije izolacionom smesom. Izolaciona smesa predstavlja mešavinu supstanci Dolphon CC-1105 i Reaktor u odnosu 5 prema 1 (na 5 g Dolphona ide 1 g Reaktora). Pre punjenja plastične kutije smesu treba dobro izmešati, a zatim se pristupa punjenju pomoću šprica i igle velikog prečnika, tako da smesa bude u nivou sa temperaturnim senzorom DS18B20 i ivicama plastične kutije, ali tako da nivo smese ne prekrije senzor DS18B20. Izgled realizovane temperaturne sonde prikazan je na slici 5.22.



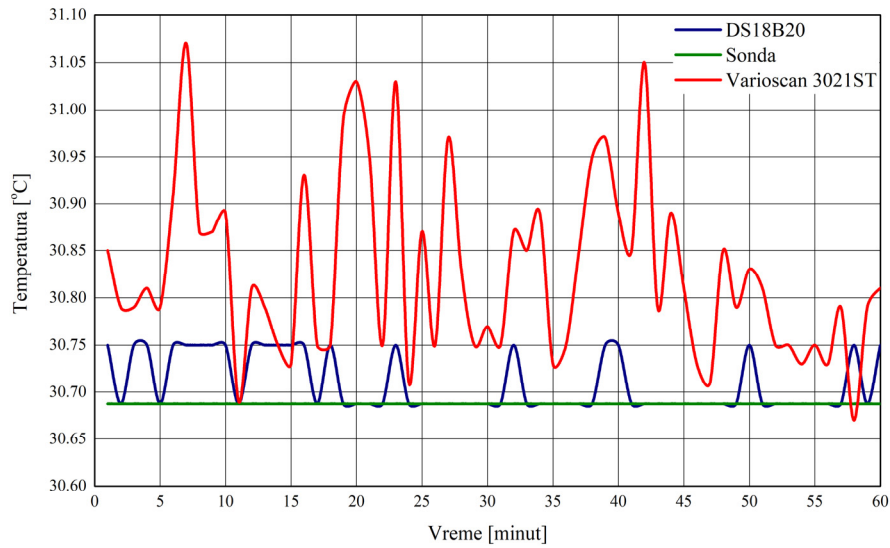
Slika 5.22 Izgled realizovane temperaturne sonde zasnovane na senzoru DS18B20

Nakon realizacije temperaturne sonde ista je povezana na merni sistem zasnovan na MCU-u PIC18F4550 (slika 5.8) fleksibilnim kablom dužine 2 m.

Testiranje realizovane temperaturne sonde izvršeno je na istom PV modulu kao i u prethodnim slučajevima, tj. u laboratorijskim i realnim uslovima rada. Montaža temperaturne sonde izvedena je lepljenjem na površinu PV modula pomoću vruće plastike po obodima plastične kutije, čime su ujedno zatvoreni vazdušni procepi. Kako bi se ostvario dobar prenos toplote sa PV modula na temperaturni senzor DS18B20, između njih je postavljena samolepljiva dupleks termo traka.

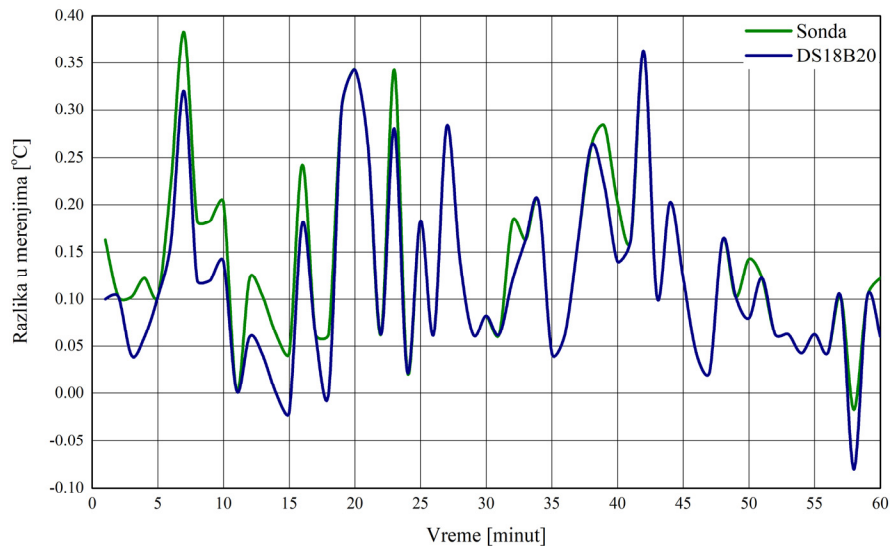
Rezultati jednočasovnog laboratorijskog testiranja tokom koga su merenja vršena na svaki minut su prikazani na slici 5.23. U cilju što bolje analize tačnosti merenja realizovane

sonde izvršeno je poređenje njenih merenja sa uporednim merenjima dobijenim temperaturnim senzorom DS18B20 i termovizijskom kamerom Varioscan 3021ST.



Slika 5.23 Rezultati laboratorijskog testiranja realizovane temperaturne sonde

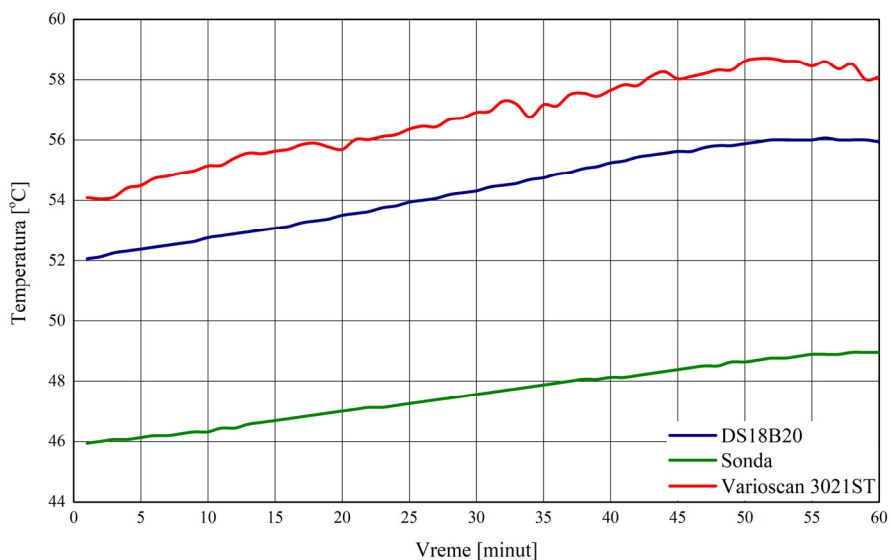
Na slici 5.24 prikazana je razlika između uporednih merenja temperaturnog senzora DS18B20 i realizovane temperaturne sonde, i termovizijske kamere Varioscan 3021ST.



Slika 5.24 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja temperaturne sonde

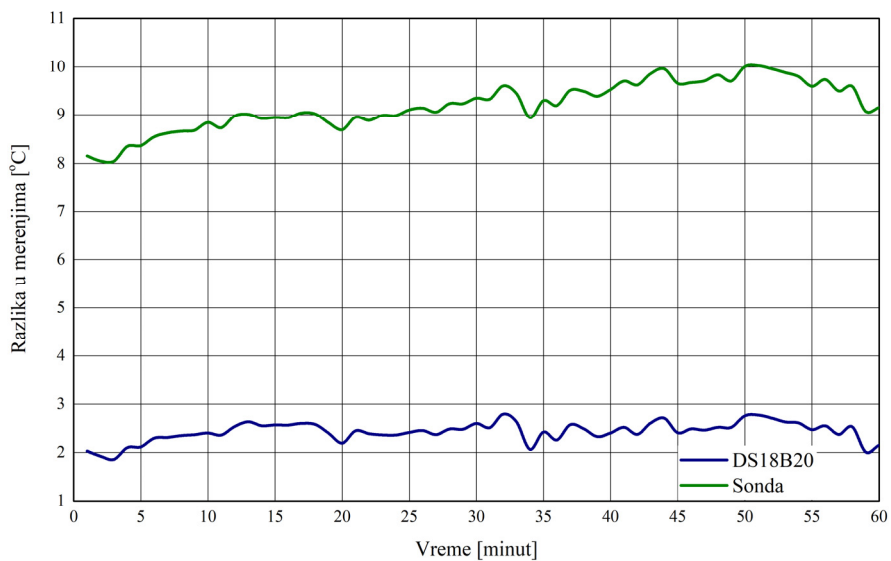
Kao što se može videti sa slike 5.24, razlika između uporednih merenja realizovane temperaturne sonde i temperaturnog senzora DS18B20 gotovo je identična.

Nakon laboratorijskog testiranja izvršeno je testiranje i u realnim uslovima rada. Rezultati jednočasovnog testiranja prikazani su na slici 5.25.



Slika 5.25 Rezultati testiranja temperature sonde u realnim uslovima rada

Na slici 5.26 prikazana je razlika između uporednih merenja temperaturnog senzora DS18B20 i realizovane temperaturne sonde, i termovizijske kamere Varioscan 3021ST.



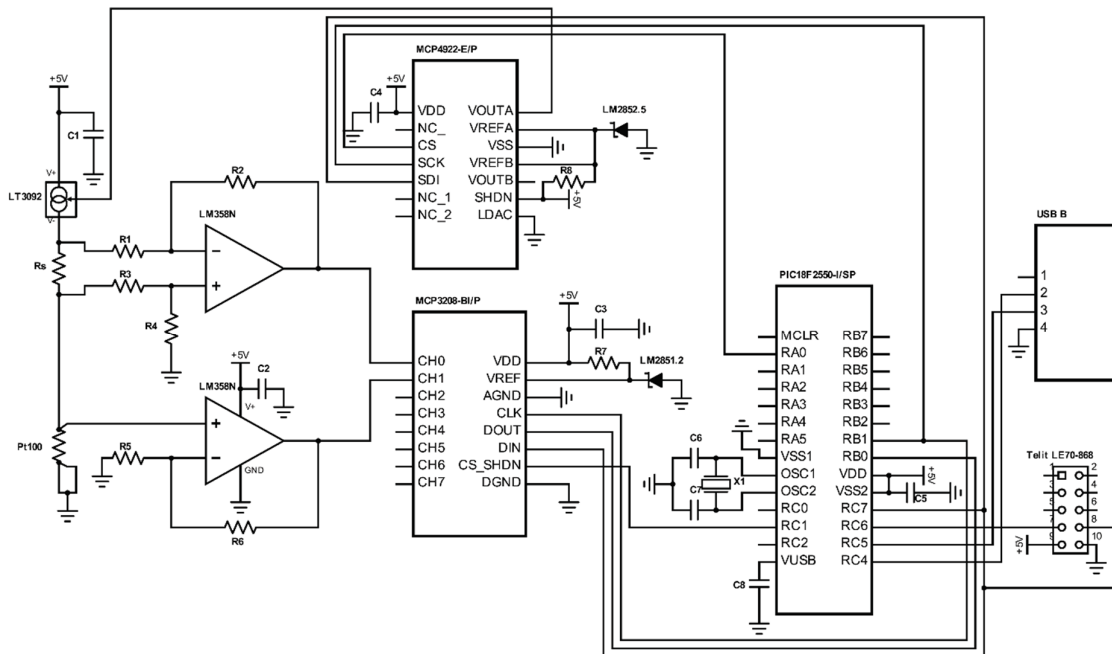
Slika 5.26 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja temperature sonde u realnim uslovima rada

Razlika između uporednih merenja od 10°C definitivno pokazuje da merenja u radu [69] nisu tačna, jer temperaturna sonda bazirana na temperaturnom senzoru DS18B20 tu nije adekvatno termički izolovana. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.26 može se zaključiti da se izolacijom senzora DS18B20 pomoću stiropora postižu mnogo tačnija merenja.

5.5 Sistem zasnovan na temperaturnom senzoru Pt100

Upotrebom Pt100 temperaturnih senzora postižu se najtačnija merenja temperature, što ujedno znači da je ovim tipom senzora moguće vršiti najtačnije merenje i temperature PV modula. Naravno, tačnost merenja temperature PV modula zavisiće od termičke izolacije temperaturnog senzora Pt100. Međutim, ograničavajući faktor u masovnoj implementaciji Pt100 senzora za merenje temperature PV modula predstavlja cena iole solidnog akvizicionog sistema. Upravo iz tog razloga pristupilo se razvoju sopstvenog sistema za merenje temperature PV modula zasnovanog na jeftinom Pt100 senzoru.

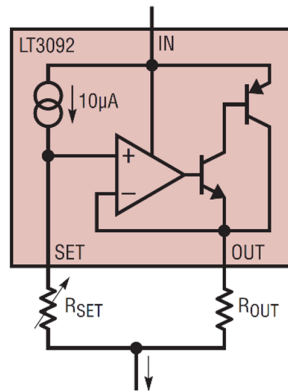
Razvijeni sistem svoj rad zasniva na upotrebi PC-a za obradu rezultata merenja, njihov prikaz i memorisanje na HDD disku u formi Excel fajla. Osnovu sistema čini MCU PIC18F2550, a merenja se obavljaju pomoću Pt100 senzora klase B sa oznakom DM-503 [76], kroz koji se propušta konstantna struja iz namenski realizovanog programabilnog strujnog izvora. Šema projektovanog i realizovanog sistema prikazana je na slici 5.27.



Slika 5.27 Šema realizovanog sistema zasnovanog na temperaturnom senzoru Pt100

Realizaciju veoma preciznog sistema za merenje temperature pomoću Pt100 temperaturnih senzora moguće je izvršiti primenom integrisanog kola poput ADS1248 [77], koje ima ugrađen strujni izvor i 24-bitni ADC konvertor. Međutim, ovakva rešenja ne omogućavaju veliki stepen fleksibilnosti podešavanja parametara.

U literaturi se može pronaći nekoliko kola za pobuđivanje temperaturnog senzora Pt100 konstantnom strujom [78, 79]. Strujni izvor za generisanje struje jačine od 1 mA, koji je primenjen u realizovanom sistemu, baziran je na kolu LT3092 [70] (slika 5.27). Izlazna struja ovog kola, ujedno i struja koja se propušta kroz senzor DM-503, može se podešavati pomoću dva otpornika na način prikazan kolom sa slike 5.28.



Slika 5.28 Podešavanje izlazne struje kola LT3092 [80]

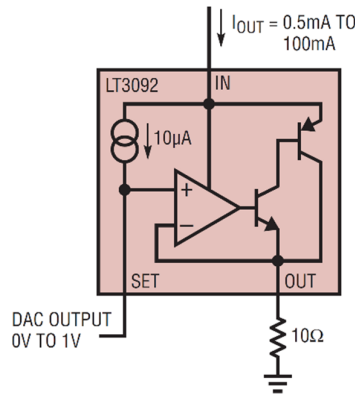
Izlazna struja kola LT3092 u mA dobija se iz sledećeg izraza [80]:

$$I_{OUT} = 10 \cdot \frac{R_{SET}}{R_{OUT}} \quad (5.1)$$

U aplikacijama u kojima je preciznost od presudnog značaja, ovakav metod regulacije struje nije naročito pogodan, jer zahteva otpornike izuzetno velike tačnosti sa specifičnim i nestandardnim otpornostima, koji ujedno imaju minimalni temperaturni drift. Pored toga, otpornost potrošača direktno utiče na intenzitet izlazne struje. Na osnovu navedenog, očigledno je da podešavanje izlazne struje otpornicima nije pogodan metod za potrošače sa promenljivom otpornošću poput temperaturnog senzora Pt100, jer će prouzrokovati neželjenu promenu izlazne struje.

Mnogo bolje i preciznije podešavanje izlazne struje kola LT3092 može se dobiti ukoliko se na SET pin dovede napon generisan digitalno-analognim konvertorom (engl. Digital-to-Analog Converter –DAC), na način prikazan na slici 5.29. Ovim kolom postiže se

digitalno upravljanje izlaznom strujom kola LT3092, a kvant promene izlazne struje zavisi od rezolucije DAC konvertora.



Slika 5.29 Podešavanje izlazne struje kola LT3092 pomoću DAC konvertora [80]

U implementaciji kola prikazanog na slici 5.29 iskorišćen je 12-bitni DAC MCP4922 [81]. Merenje izlazne struje je ostvareno pomoću otpornika R_s , povezanog na pin OUT kola LT3092 (slika 5.27). Obzirom na to da je reč o šant otporniku, neophodno je primeniti otpornik sa dobrim temperaturnim koeficijentom i velikom tačnošću (tj. malom tolerancijom), kako bi izlazna struja bila što tačnija i stabilnija. Upravo iz tog razloga je upotrebljen otpornik PCF0805-13-1K-B-T1 sa otpornošću od 1 k Ω , tolerancijom od $\pm 0.1\%$ i temperaturnim koeficijentom od ± 5 ppm. Otpornik otpornosti od 1 k Ω implementiran je iz jednostavnog razloga, jer se propuštanjem struje od 1 mA na njemu stvara napon od 1 V. Izlazna struja se dobija iz sledećeg izraza:

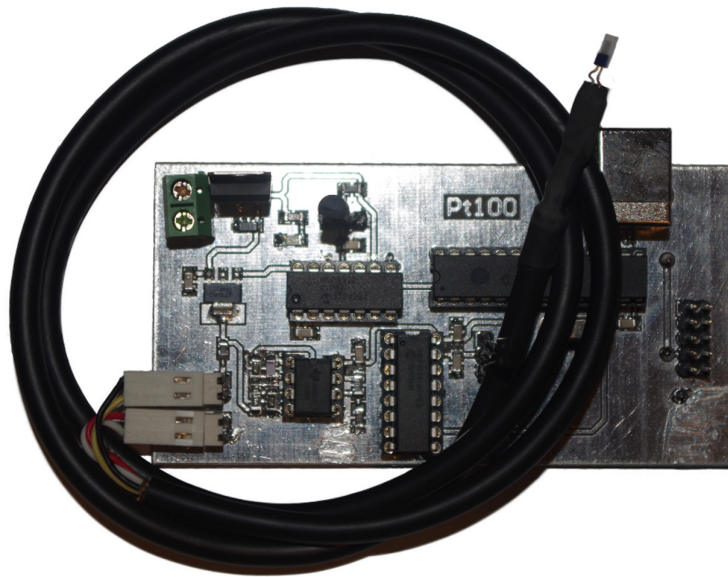
$$I_{OUT} = \frac{V_{R_s}}{R_s} \quad (5.2)$$

pri čemu je V_{R_s} pad napona na otporniku R_s .

Pad napona na otporniku R_s se preko diferencijalnog pojačavača sa jediničnim pojačanjem dovodi na ulaz ADC konvertora. U realizovanom rešenju iskorišćen je 12-bitni ADC konvertor MCP3208 [82]. Na osnovu vrednosti napona V_{R_s} , MCU povećava ili smanjuje napon na SET pinu, povećavajući ili smanjujući izlazni napon MCP4922 DAC konvertora. Na ovaj način se dobija konstantna izlazna struja bez obzira na otpornost potrošača (temperaturnog senzora Pt100), pod uslovom da je ona manja od 1.5 k Ω . Otpornost potrošača ograničena je vrednošću referentnog napona MCP4922 DAC konvertora od 2.5 V. Velika prednost ovakvog rešenja je ta što se intenzitet izlazne struje može podešavati softverskim

putem, bez ikakvih hardverskih izmena. Prema dostupnoj naučnoj literaturi, ovo je prvi put da se Pt100 temperaturni senzor pobuđuje na ovaj način.

Kako bi se ostvarila što veća rezolucija merenja temperature PV modula, napon na temperaturnom senzoru DM-503 pojačan je neinvertujućim pojačavačem, čiji se izlaz dovodi na drugi ulazni kanal MCP3208 konvertora. Kao što je već naglašeno u poglavlju 3.6, najtačnija merenja otpornosti temperaturnog senzora Pt100 dobijaju se primenom 4-žičnog merenja (Kelvinovog merenja). Upravo iz tog razloga pobudna struja senzora DM-503 se dovodi putem dve žice, dok se napon sa njega na neinvertujući pojačavač dovodi putem drugog para žica. U tu svrhu je za povezivanje senzora DM-503 u kolo iskorišćen 4-žični širmovani upredeni kabl od 50 cm. Izgled realizovanog sistema prikazan je na slici 5.30.



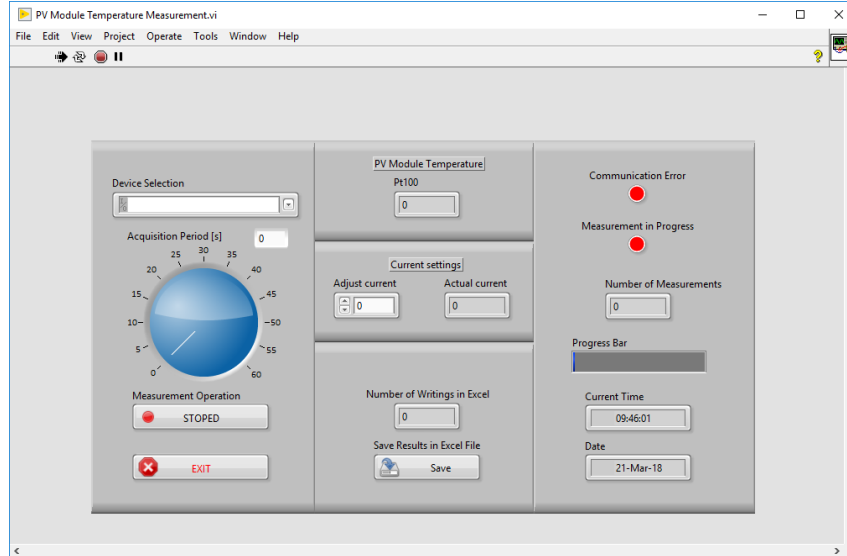
Slika 5.30 Izgled realizovanog sistema zasnovanog na temperaturnom senzoru Pt100

Nakon dobijanja rezultata merenja, MCU ih prosleđuje PC računaru putem integrisane USB HID komunikacije, tj. prosleđuje ih specijalno razvijenom virtuelnom instrumentu. Virtuelni instrument, razvijen u LabVIEW-u, vrši obradu rezultata merenja, njihov prikaz i memorisanje u formi Excel fajla na HDD disku. Obrada rezultata merenja vrši se pomoću izraza (3.10) i (3.11). Izgled prozora realizovanog virtuelnog instrumenta prikazan je na slici 5.31.

Kako bi merenja realizovanog sistema bila apsolutno pouzdana i tačna, neophodno je da pobudna struja temperaturnog senzora DM-503 bude tačno 1 mA, bez obzira na promenu otpornosti senzora i ambijentalne temperature, jer se bilo kakvo odstupanje direktno odražava na tačnost izmerene temperature PV modula. Obzirom da je strujni izvor ključna komponenta

sistema, neophodno je izvršiti njegovo zasebno testiranje. Shodno tome, testiranje predloženog strujnog izvora izvršeno je u dve faze:

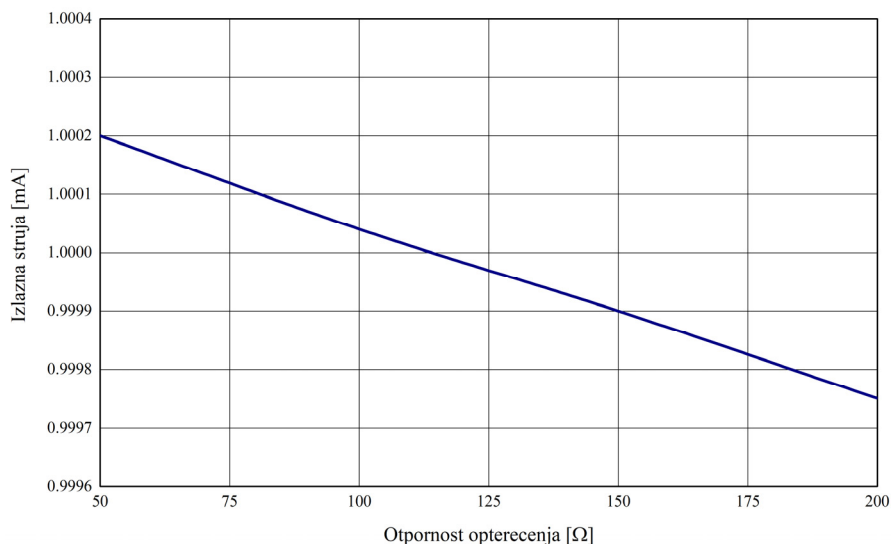
- Sa promenljivom otpornošću opterećenja;
- U širokom opsegu ambijentalne temperature.



Slika 5.31 Izgled realizovanog virtuelnog instrumenta

Pod pretpostavkom da temperatura PV modula neće preći 100°C [43], može se smatrati da otpornost temperaturnog senzora DM-503 neće premašiti vrednost od $140\ \Omega$. Međutim, za adekvatno testiranje strujnog izvora sa promenljivom otpornošću opterećenja iskorišćen je višeobrtni potencijometar od $220\ \Omega$, povezan u kolu umesto senzora DM-503. Testiranje je izvršeno tako što je otpornost potencijometra postepeno povećavana u diskretnim koracima od $50\ \Omega$ do $200\ \Omega$, pri čemu je pobudna struja merena multimetrom Keysight 34410A. Rezultati ovog testa prikazani su na slici 5.32.

Kao što se može videti sa slike 5.32, promena intenziteta pobudne struje manja je od $\pm 250\ \text{nA}$, pri čemu pobudna struja ima trend opadanja kako otpornost opterećenja raste. Neophodno je naglasiti da temperature PV modula, pri kojima bi otpornost temperaturnog senzora Pt100 bila iznad $160\ \Omega$, odnosno ispod $85\ \Omega$, prema dostupnoj naučnoj literaturi nikad nisu zabeležene i zapravo prevazilaze dozvoljene granice specificirane od strane proizvođača. Shodno tome, promena intenziteta pobudne struje u korisnom opsegu promene otpornosti opterećenja, manja je od $\pm 125\ \text{nA}$. Međutim, čak i kad bi promena od $\pm 250\ \text{nA}$ bila moguća, uticala bi na tačnost merenja za maksimalno $\pm 0.025\%$, što se može smatrati zanemarljivim.



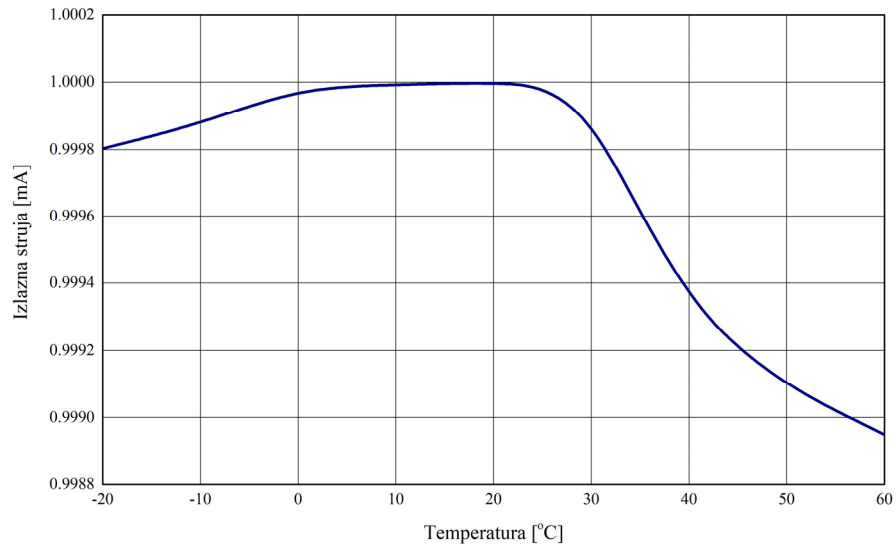
Slika 5.32 Rezultati testa realizovanog sistema sa promenljivom otpornošću opterećenja

S obzirom na to da će realizovani sistem raditi neprestano u svim vremenskim uslovima, strujni izvor mora biti sposoban da održava pobudnu struju konstantnom bez obzira na promenu ambijentalne temperature. Upravo iz ovog razloga izvršeno je testiranje realizovanog sistema u širokom temperaturnom opsegu, smeštanjem realizovanog sistema u temperaturnu komoru TestEquity Model 115A. Merna postavka ovog eksperimenta prikazana je na slici 5.33.



Slika 5.33 Testiranje realizovanog sistema pri promenljivoj ambijentalnoj temperaturi

Temperaturni opseg tokom testiranja kretao se u granicama od -20°C do 60°C , u diskretnim koracima od 10°C , sa vremenskim razmakom od 15 minuta po dostizanju zadate temperature, kako bi komponente realizovanog sistema bile u izotermalnim uslovima. Pobudna struja temperaturnog senzora DM-503 merena je multimetrom Keysight 34410A. Rezultati sprovedenog testa prikazani su na slici 5.34.



Slika 5.34 Rezultati testa realizovanog sistema pri promenljivoj ambijentalnoj temperaturi

Kao što se može videti sa slike 5.34, pobudna struja temperaturnog senzora DM-503 ima trend opadanja pri promeni ambijentalne temperature za 20°C . Kada je vrednost ambijentalne temperature 20°C , pobudna struja temperaturnog senzora DM-503 ima najtačniju i najstabilniju vrednost. Trend opadanja pobudne struje temperaturnog senzora DM-503 posebno je naglašen nakon što ambijentalna temperatura premaši 25°C , dok je značajno niži pri smanjenju ambijentalne temperature. Razlika između pobudne struje na temperaturama od 20°C i -20°C manja je od 200 nA , a razlika između pobudne struje na temperaturama od 20°C i 60°C je oko $1\text{ }\mu\text{A}$. Ove dve razlike utiču na tačnost merenja temperature PV modula za približno 0.02% , odnosno 0.1% , što se takođe može smatrati zanemarljivim.

Neophodno je naglasiti da će tokom predviđenog rada realizovani sistem biti smešten u zatvorenom ormaru, pa sasvim izvesno ambijentalna temperatura, kojoj će realizovani sistem biti izložen, nikad neće dostići ekstremne vrednosti prikazane na slici 5.34, što ujedno znači da će očekivana merna greška biti manja od 0.1% .

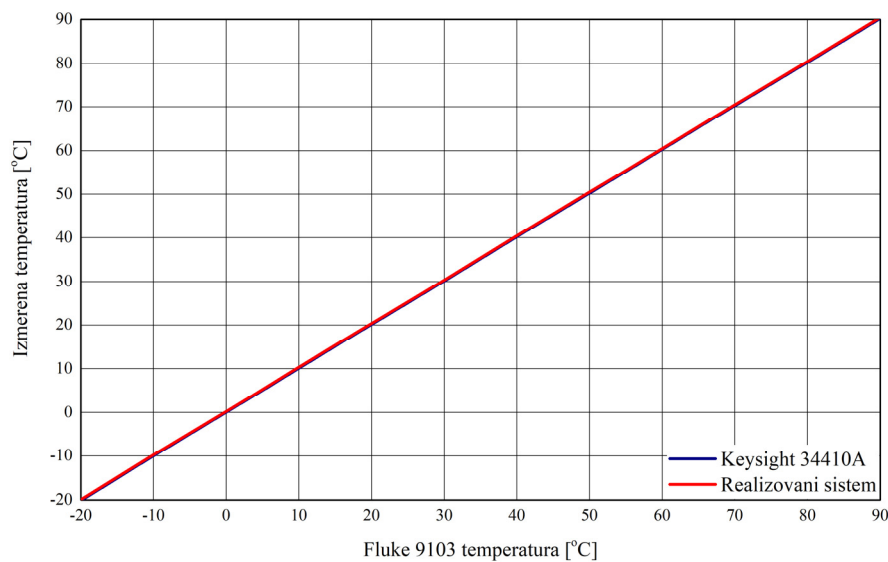
Na osnovu rezultata dobijenih iz obe faze testiranja realizovanog sistema, može se zaključiti da razvijeni strujni izvor odlično održava pobudnu struju temperaturnog senzora DM-503 konstantnom. Shodno tome, nedvosmisleno se može zaključiti da razvijeni strujni izvor ispunjava uslove za precizno i pouzdano pobuđivanje Pt100 senzora.

Nakon testiranja strujnog izvora neophodno je testirati realizovani sistem kao celinu. Testiranje realizovanog sistema je izvršeno u dve faze:

- U laboratoriji, korišćenjem temperaturnog kalibratora Fluke 9103 Dry-well;
- Na otvorenom prostoru, na PV modulu, u realnim uslovima rada.

Iako se otpornost senzora Pt100 lako konvertuje u vrednost izmerene temperature primenom izraza (3.10) i (3.11), čak i najmanji ofset, greška pojačanja pojačavača ili greška konverzije ADC konvertora, mogu prouzrokovati značajne greške izmerene temperature PV modula. Samim tim je najpre neophodno sprovesti proces kalibracije predloženog sistema.

Osnovni cilj laboratorijskog testiranja je da se proceni tačnost realizovanog sistema nakon izvršene kalibracije. Tokom ove faze testiranja, temperaturni senzor DM-503 izložen je širokom temperaturnom opsegu pomoću temperaturnog kalibratora Fluke 9103. Temperaturni opseg kretao se u granicama od -20°C do 90°C , u diskretnim koracima od 10°C , sa vremenskim razmakom od 10 minuta po dostizanju zadate temperature, kako bi temperaturni senzor DM-503 bio u izotermalnim uslovima. Akvizicija merenja sa temperaturnog senzora DM-503 vršena je naizmenično od strane predloženog sistema i multimetra Keysight 34410A, primenom 4-žičnog temperaturnog merenja. Rezultati ovog testa su prikazani na slici 5.35.

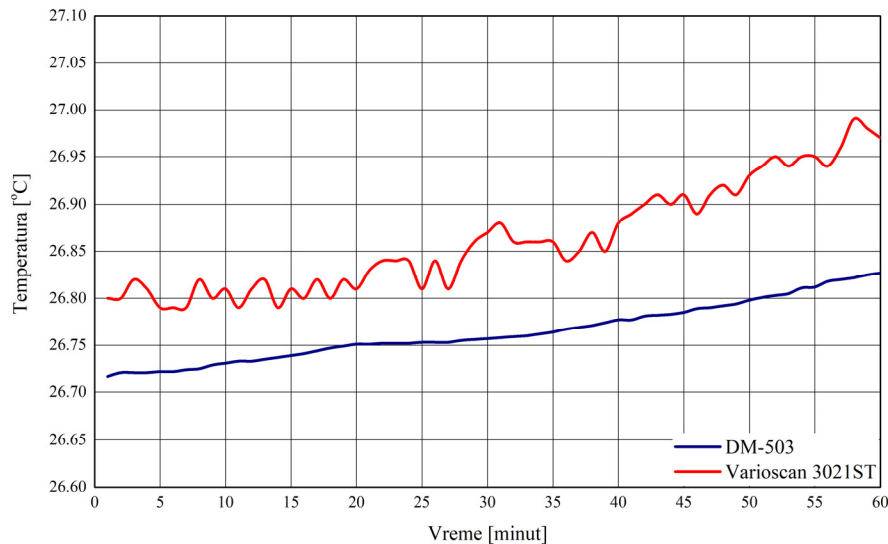


Slika 5.35 Poređenje između merenja realizovanog sistema i merenja sa multimetrom Keysight 34410A

Sa slike 5.35, može se videti da se merenja realizovanog sistema odlično poklapaju sa merenjima multimetra Keysight 34410A, na osnovu čega se može zaključiti da rezultati ovog testiranja definitivno potvrđuju preciznost strujnog izvora, kao i celog realizovanog sistema.

Kao što je već više puta naglašeno, kontakti temperaturni senzori moraju biti termički izolovani prilikom merenja temperature PV modula. Termička izolacija senzora DM-503 je izvedena kao i u slučaju temperaturnog senzora DS18B20, tj. pomoću identičnog bloka stiropora koji je predložen u radu [73].

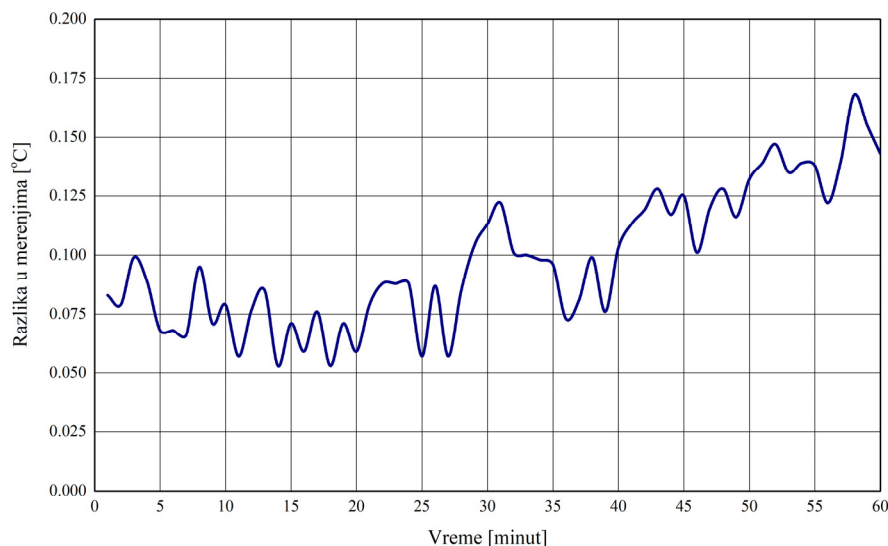
Naravno, testiranje realizovanog sistema izvedeno je u dve faze, kao i u slučaju prethodnih senzora, korišćenjem termovizijske kamere Jenoptik Varioscan 3021ST kao referentnog instrumenta. Rezultati jednočasovnog testiranja realizovanog sistema u laboratorijskim uslovima prikazani su na slici 5.36.



Slika 5.36 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100

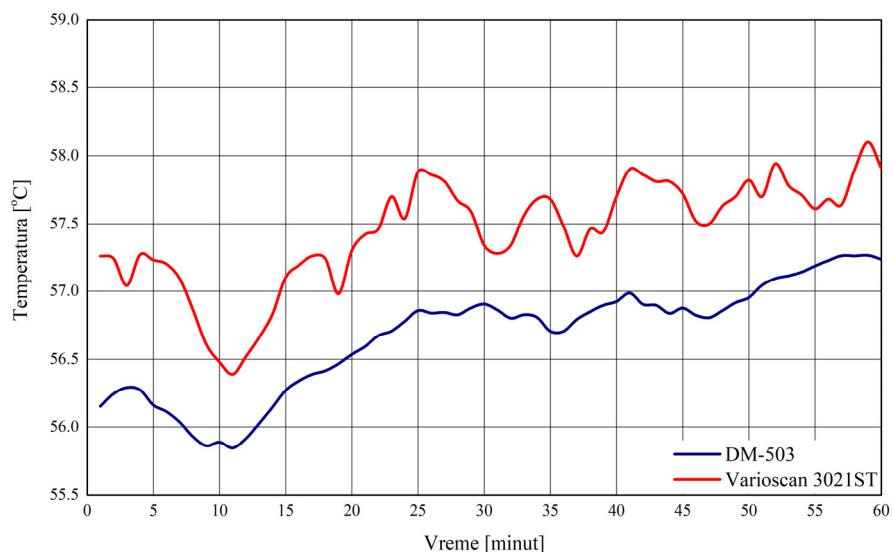
Razlika između uporednih merenja sa realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST prikazana je na slici 5.37.

Kao što se može videti sa slike 5.37, razlika između uporednih merenja sa realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST manja je od 0.2°C , što je ujedno najmanja vrednost razlike zabeležena tokom laboratorijskog testiranja svih dosadašnjih rešenja.



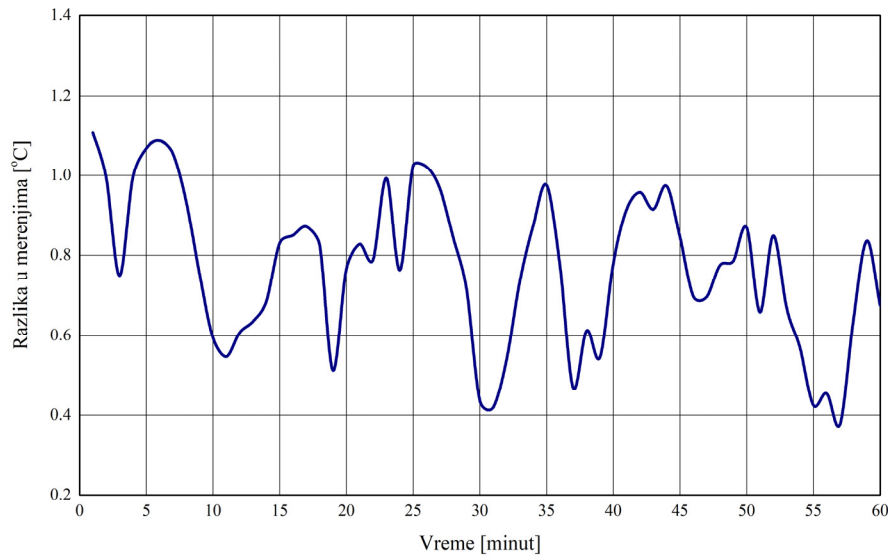
Slika 5.37 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100

Rezultati jednočasovnog testiranja realizovanog sistema u realnim uslovima rada, tokom koga je ambijentalna temperatura iznosila 28°C, prikazani su na slici 5.38.



Slika 5.38 Rezultati testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100 u realnim uslovima rada

Uporedna razlika između merenja pomoću realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST dobijena tokom testiranja u realnim uslovima rada prikazana je na slici 5.39.



Slika 5.39 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja sistema zasnovanog na senzoru Pt100 u realnim uslovima rada

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.39, očito je da je razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST manja od 1.2°C. Osim toga, merenja realizovanog sistema imaju znatno manje fluktuacije u odnosu na merenja sa termovizijske kamere Varioscan 3021ST. Dobijena razlika između uporednih merenja predstavlja najmanje zabeleženo odstupanje, koje savršeno odgovara odstupanju prikazanom u radu [73].

5.6 Sistem zasnovan na IR temperaturnom senzoru MLX90614

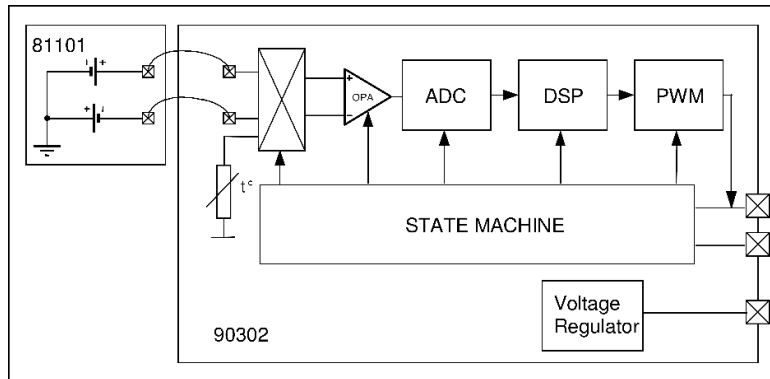
Dosadašnji eksperimenti potvrđuju kompleksnost merenja temperature PV modula kontaktnim temperaturnim sensorima, usled problema sa njihovom montažom na PV modul i termičkom izolacijom. Neadekvatnim pristupom merenju temperature, na ovaj način mogu se dobiti značajne merne greške.

Koristeći prednosti koje pružaju beskontaktni temperaturni senzori, zasnovani na merenju emisije IR zračenja, mogu se u potpunosti izbeći neki od problema koji se javljaju sa kontaktnim temperaturnim sensorima prilikom merenja temperature PV modula. Najbolji metod za proveru ove hipoteze je eksperimentalni metod, i to realizacijom sopstvenog rešenja, korišćenjem jeftinih i lako dostupnih komercijalnih komponenti. U tu svrhu je iskorišćen IR temperaturni senzor MLX90614ESF-ACF [83], koji je relativno jeftin.

Temperaturni senzor MLX90614 sastoji se od dva integrisana čipa i to:

- IR termopajla MLX8110;
- Specijalno razvijenog kola za obradu signala sa IR senzora MLX90302.

Zahvaljujući niskošumnom pojačavaču, ADC konvertoru rezolucije od 17-bitna i moćnom digitalnom procesoru za obradu signala (engl. Digital Signal Processor – DSP) MLX90302, dobijaju se visoka tačnost i rezolucija merenja temperaturnog senzora MLX90614. Blok dijagram ovog temperaturnog senzora prikazan je na slici 5.40.



Slika 5.40 Blok dijagram IR temperaturnog senzora MLX90614 [83]

Izlazni signal sa IR termopajla pojačava se niskošumnim čoper pojačavačem, koji odlikuje mali ofset i programabilna regulacija pojačanja. Izlaz čoper pojačavača dovodi se na ulaz 17-bitnog sigma delta ADC konvertora, koji rezultate AD konverzije prosleđuje moćnom DSP procesoru na dalju obradu i slanje.

Dodatna prednost ovog temperaturnog senzora predstavlja ugrađeni optički filter koji filtrira vidljivu svetlost i svetlost blisku IR opsegu, odnosno pruža imunost na ambijentalnu i Sunčevu svetlost. Propusni opseg ovog filtra je od 5.5 μm do 14 μm . Osim toga, temperaturni senzor MLX90614 se isporučuje fabrički kalibrisan u širokom temperaturnom opsegu od -40°C do 125°C za ambijentalnu temperaturu, i od -70°C do 380°C za temperaturu objekta.

Mana ovog temperaturnog senzora predstavlja osetljivost na temperaturne razlike na kućištu samog senzora, pa je zato u realizovanom sistemu iskorišćena verzija senzora sa oznakom xCx, koja pruža veliku imunost na temperaturne razlike na kućištu senzora [84].

Shodno proverenom metodu rada, realizovani sistem svoj rad zasniva na upotrebi PC računara za obradu rezultata merenja, njihov prikaz i skladištenje na HDD disku u formi Excel fajla. Osnovu realizovanog sistema čini PIC18F4550 MCU, na koji je temperaturni

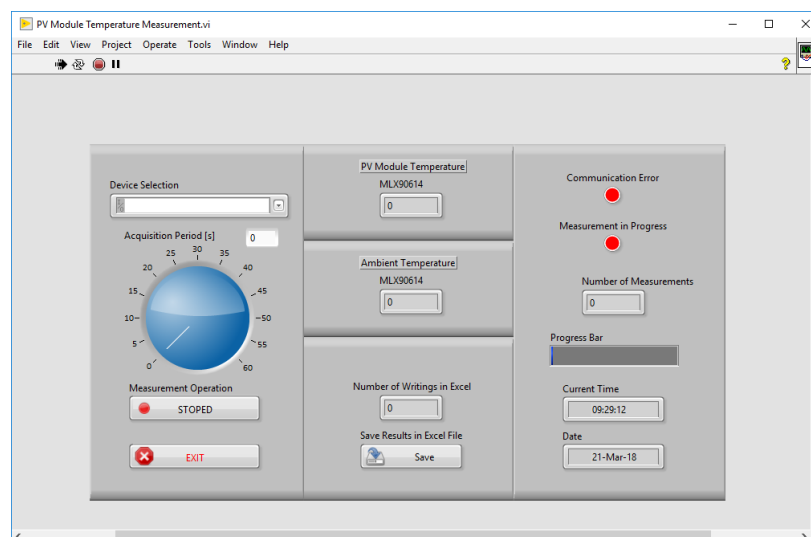
senzor MLX90614 povezan pomoću I²C komunikacije. Izgled realizovanog sistema prikazan je na slici 5.41.



Slika 5.41 Izgled realizovanog sistema zasnovanog na senzoru MLX90614

Kako bi montaža temperaturnog senzora MLX90614 bila što jednostavnija, isti je sa realizovanim sistemom povezan pomoću fleksibilnog širmovanog kabla dužine 2 m.

Izgled prozora realizovanog virtuelnog instrumenta u LabVIEW softveru prikazan je na slici 5.42.



Slika 5.42 Izgled realizovanog virtuelnog instrumenta

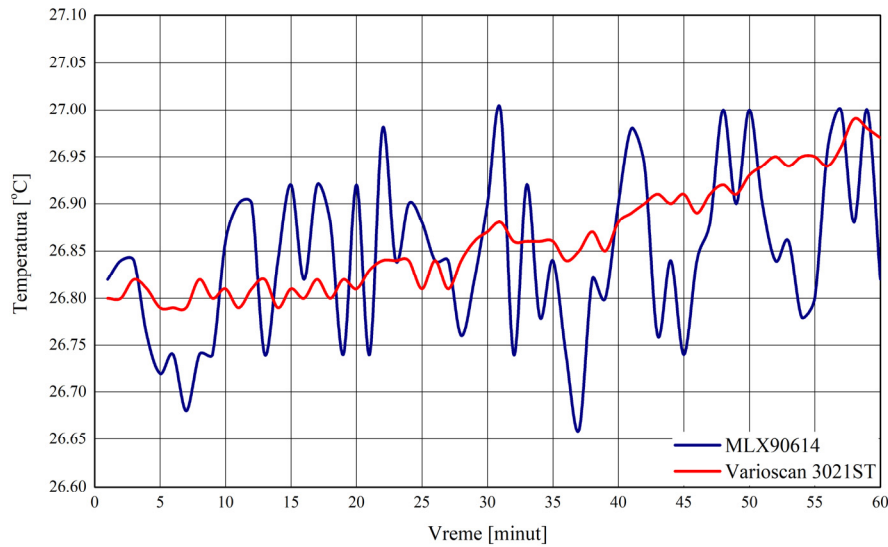
Temeljno testiranje sistema obuhvatalo je laboratorijsko testiranje u trajanju od nekoliko nedelja u cilju provere podešene vrednosti emisivnosti na temperaturnom senzoru MLX90614, nakon čega se pristupilo testiranju na PV modulu izloženom ambijentalnom uticaju, tj. u realnim uslovima rada. Tokom testiranja realizovanog sistema, temperaturni senzor MLX90614 montiran je pod pravim uglom u odnosu na površinu PV modula, jer su tada merenja najtačnija. Naime, promena upadnog ugla zahteva korekciju podešene emisivnosti mernog instrumenta [85, 86, 87]. S obzirom da je FOV ugao ovog temperaturnog senzora svega 10° , njegova montaža na PV modul izvršena je na udaljenosti od 5 cm, tako da “gađa” centar PV ćelije, shodno uputstvu iz poglavlja 3.5 prikazanom na slici 3.12 [88].

Tokom laboratorijskog testiranja, eksperimentalnim putem je određen maksimalni upadni ugao pri kome ne dolazi do promene vrednosti izmerene temperature, i taj ugao iznosi 30° . Zahvaljujući maloj vrednosti FOV ugla, maksimalno rastojanje između temperaturnog senzora MLX90614 i PV modula iznosi 30 cm. Laboratorijska testiranja su, i ovaj put, izvedena na istom PV modulu kao i u prethodnim eksperimentima, a validacija merenja realizovanog sistema je takođe izvršena termovizijskom kamerom Jenoptik Varioscan 3021ST. Izgled merne postavke ovog eksperimenta prikazan je na slikama 5.13 i 5.43 [88].



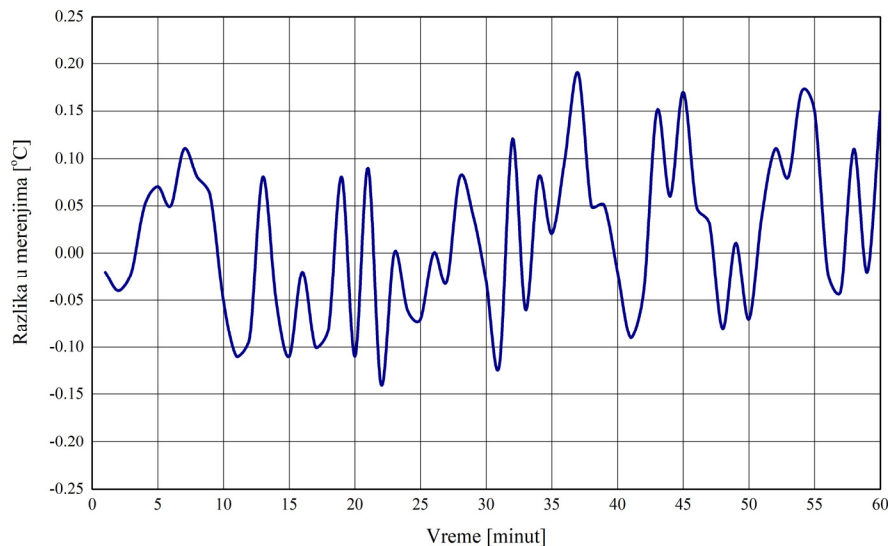
Slika 5.43 Merna postavka laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614 [88]

Kao što je već naglašeno, podešena vrednost emisivnosti termovizijske kamere Varioscan 3021ST i temperaturnog senzora MLX90614 je od presudnog značaja za tačnost dobijenih merenja. Kao i u prethodnim eksperimentima, podešena vrednost emisivnosti termovizijske kamere Varioscan 3021ST, ujedno i temperaturnog senzora MLX90614, iznosi 0.85. Rezultati jednočasovnog laboratorijskog testiranja prikazani su na slici 5.44.



Slika 5.44 Rezultati laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614

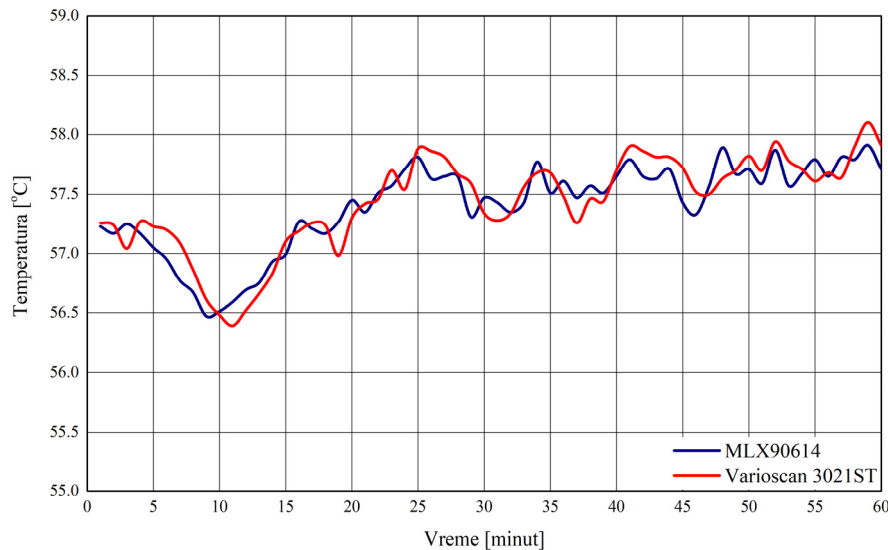
Na slici 5.44 može se videti odlično poklapanje između uporednih merenja termovizijske kamere Jenoptik Varioscan 3021ST i temperaturnog senzora MLX90614, s tim što merenja temperaturnog senzora MLX90614 imaju veću fluktuaciju od referentnih merenja. Neophodno je naglasiti da realizovani sistem ne vrši nikakvo usrednjavanje i filtriranje rezultata merenja. Razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST prikazana je na slici 5.45.



Slika 5.45 Razlika između uporednih merenja tokom laboratorijskog testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614

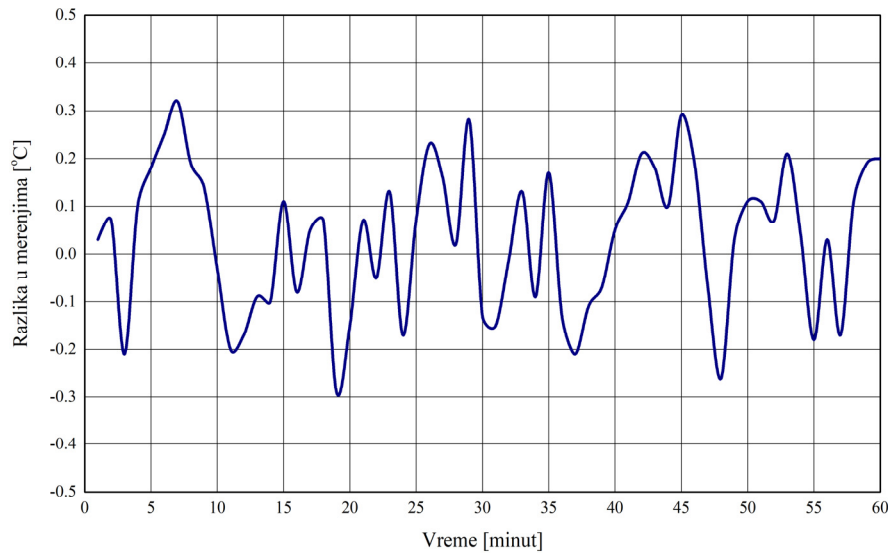
Razlika između uporednih merenja prikazana na slici 5.45 manja je od $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, što predstavlja najmanju razliku između uporednih merenja zabeleženu tokom laboratorijskog testiranja svih realizovanih rešenja. Pored toga, grafik merenja realizovanog sistema preklapa grafik merenja termovizijske kamere Varioscan 3021ST dok je kod kontaktnih temperaturnih senzora razlika između uporednih merenja uvek bila pozitivna tj. njihova merenja su uvek bila niža od merenja termovizijske kamere Varioscan 3021ST.

Nakon laboratorijskog testiranja pristupilo se testiranju u realnim uslovima rada. Rezultati jednočasovnog testiranja realizovanog sistema u realnim uslovima rada, tokom koga je ambijentalna temperatura iznosila 28°C , prikazani su na slici 5.46.



Slika 5.46 Rezultati testiranja u realnim uslovima rada sistema zasnovanog na senzoru MLX90614

Na osnovu slike 5.46 evidentno je da čak i pri razlici od gotovo 30°C između ambijentalne temperature i temperature PV modula, merenja realizovanog sistema se odlično poklapaju sa uporednim merenjima termovizijske kamere Varioscan 3021ST pri čemu merenja realizovanog sistema preklapaju merenja termovizijske kamere. Razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću realizovanog sistema i termovizijske kamere Varioscan 3021ST prikazana je na slici 5.47.

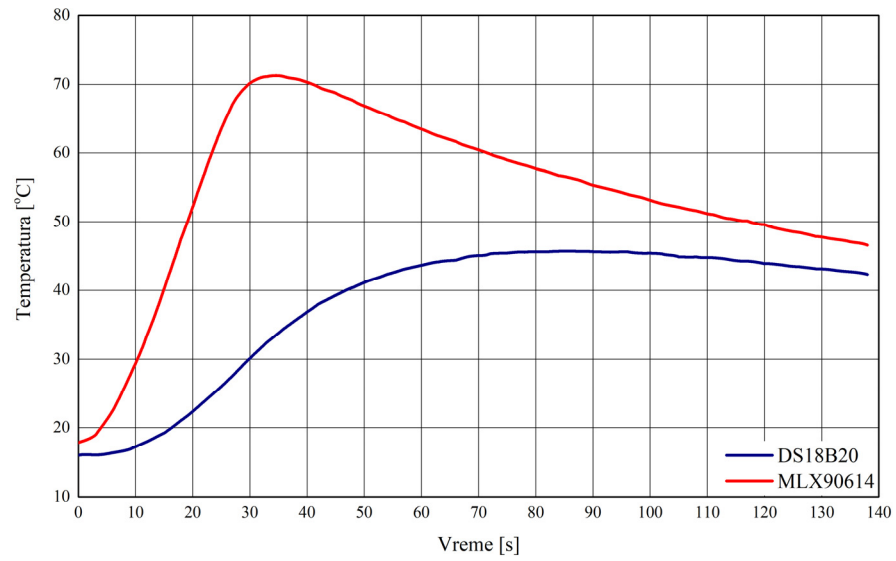


Slika 5.47 Razlika između uporednih merenja tokom testiranja sistema zasnovanog na senzoru MLX90614 u realnim uslovima rada

Na osnovu slika 5.45 i 5.47 primetno je da je razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću realizovanog sistema i referentnog instrumenta porasla za svega $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, pa tako iznosi manje od $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ pri razlici od gotovo 30°C između ambijentalne temperature i temperature PV modula. Drugim rečima, primenom realizovanog sistema zasnovanog na beskontaktnom IR senzoru MLX90614 dobijena su najtačnija merenja temperature PV modula u poređenju sa svim prethodno korišćenim kontaktnim temperaturnim sensorima. Pri tome, navedena razlika može se dodatno smanjiti usrednjavanjem dobijenih merenja i jednostavnim oduzimanjem tzv. ofseta merenja od izmerene vrednosti temperature.

Na slici 3.10 prikazana je još jedna prednost beskontaktnih temperaturnih senzora, u odnosu na kontaktne, a koja se odnosi na vreme odziva senzora na promenu temperature tela. Kako bi se odredilo koliko je beskontaktni temperaturni senzor MLX90614 brži od termički izolovanog kontaktnog temperaturnog senzora DS18B20 izvršen je eksperiment u kom je prednja strana PV modula veoma brzo zagrejana iz izotermalnog stanja na temperaturu od 70°C , a rezultati ovog eksperimenta prikazani su na slici 5.48.

Uklanjanjem izvora toplote temperatura koju beskontaktni temperaturni senzor MLX90614 meri počinje da opada, dok temperatura koju kontaktni temperaturni senzor DS18B20 meri raste gotovo ceo minut duže. Na osnovu merenja sa slike 5.48 može se zaključiti da termički izolovan kontaktni temperaturni senzor DS18B20 možda neće detektovati nagle i skokovite promene temperature PV modula.



Slika 5.48 Odziv temperaturnih senzora DS18B20 i MLX90614

6. ANALIZA I DISKUSIJA OSTVARENIH REZULTATA

U toku rada na disertaciji, krenulo se od upoznavanja sa uticajem temperature na efikasnost PV ćelija, a samim tim i na efikasnost PV modula. Pojašnjeno je da izlazna snaga PV modula značajno opada sa porastom temperature njegovih PV ćelija. Porast temperature PV ćelija iznad 25°C dovodi do smanjenja izlazne snage PV modula najčešće po stopi od $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$. Direktnim Sunčevim zračenjem, temperatura PV modula tokom letnjih dana lako premašuje vrednost od 60°C i to u slučaju PV modula koji nisu montirani na kose krovove. U slučaju montaže na kosim krovovima temperatura PV modula premašuje vrednost od 80°C. Nepreciznim, odnosno neadekvatnim merenjem temperature PV modula, može se napraviti značajna merna greška, koja se tokom proračuna, koji se zasnivaju na tim merenjima, manifestuje kao gubitak izlazne snage PV modula usled nepoznatog uzroka.

Temperatura PV modula može se pod odgovarajućim uslovima dobiti na osnovu vrednosti napona otvorenog kola, može se proceniti matematičkim modelom ili se može izmeriti neposredno primenom odgovarajućeg mernog sistema. Budući da je akcenat doktorske disertacije na direktnom merenju temperature PV modula primenom temperaturnih senzora, dat je samo pregled najčešće korišćenih matematičkih modela za procenu temperature PV modula u zavisnosti od ambijentalnih parametara.

Obzirom na to da tačnost merenja temperature PV modula gotovo u potpunosti zavisi od tipa korišćenog temperaturnog senzora, odnosno njegove tačnosti, veoma je važno izvršiti analizu mogućnosti merenja temperature PV modula pomoću svih tipova komercijalno dostupnih temperaturnih senzora, kako bi se izbeglo ili eventualno umanjilo nepotrebno gubljenje vremena na realizaciju nepodesnih i netačnih rešenja. Shodno tome, izvršena je odgovarajuća analiza trenutno dostupnih tipova komercijalnih senzora u smislu njihove primene za merenje temperature PV modula, odnosno mogućnosti merenja iste.

Povećanje tačnosti merenja temperature PV modula iziskuje poznavanje osnovnih nedostataka postojećih rešenja za merenje temperature PV modula, u cilju razvoja eventualnih odgovarajućih metoda za kompenzaciju. U tu svrhu, u disertaciji je izvršena temeljna analiza najčešće korišćenih, odnosno najreprezentativnijih, postojećih rešenja iz dostupne naučne i stručne literature. Analiza obuhvata i eksperimentalnu proveru tačnosti merenja određenih

rešenja, koja se mogu realizovati primenom kvalitetnog referentnog instrumenta, tj. termovizijske kamere Jenoptik Varioscans 3021ST. Ova kamera ima osetljivost 0.03°C . Provera tačnosti merenja pojedinih postojećih rešenja najpre je izvršena u laboratoriji pod izotermalnim uslovima, tj. kada je temperatura PV modula gotovo jednaka ambijentalnoj temperaturi laboratorije, a PV modul nije izložen Sunčevom zračenju. Zatim, provera tačnosti izvršena je u realnim uslovima rada na istom PV modulu izloženom ambijentalnom uticaju i direktnom Sunčevom zračenju tokom leta, kada je ambijentalna temperatura najveća. Osnovni cilj ovakvog testiranja je postizanje što veće razlike između ambijentalne temperature i temperature PV modula, čime bi se ostvario veći termalni gradijent na kućištu senzora.

Analiza postojećih rešenja najpre polazi od rešenja zasnovanog na kontaktnom temperaturnom senzoru RTF4, koji zapravo predstavlja temperaturni senzor Pt100 klase tačnosti B, obmotan silikonskim izolacionim omotačem. Navedeni temperaturni senzor predstavlja jedno od najčešće korišćenih rešenja za merenje temperature PV modula koje se sreće u naučnoj i stručnoj literaturi. Osim toga, temperaturni senzor RTF4 često se koristi kao referentni senzor za kalibraciju sopstvenih rešenja. Akvizicija merenja sa ovog temperaturnog senzora izvršena je pomoću multimetra Keysight 34410A 4-žičnim merenjem otpornosti. Analizom rezultata merenja dobijenih u realnim uslovima rada uočena je značajna razlika između uporednih merenja termovizijske kamere Varioscans 3021ST i temperaturnog senzora RTF4. Naime, merenja temperaturnog senzora RTF4 su za 10°C niža u odnosu na uporedna merenja termovizijske kamere Varioscans 3021ST. Navedena greška nikako nije zanemarljiva jer "prikrića" pad izlazne snage PV modula od gotovo 5%. Glavni uzrok ove merne greške predstavlja nedovoljna termička izolacija Pt100 temperaturnog senzora, usled čega se na njegovom kućištu javlja temperaturni gradijent.

Obzirom da digitalni temperaturni senzor DS18B20, zbog svoje niske cene i dobre tačnosti, ima sve veću primenu u merenju temperature PV modula, izvršena je eksperimentalna analiza tačnosti merenja realizovane temperaturne sonde zasnovane na ovom senzoru. Ideja za navedenu realizaciju potiče iz istraživanja publikovanog u dva vrhunska časopisa. Dobijeni rezultati merenja su u potpunosti istovetni sa rezultatima testiranja temperaturnog senzora RTF4, što znači da ni u ovom slučaju termička izolacija nije bila dovoljna da obezbedi odgovarajuću tačnost merenja temperature PV modula.

Sagledavajući nedostatke prethodnog rešenja, pristupilo se termičkoj izolaciji temperaturnog senzora DS18B20 blokom stiropora na način koji je izveden u istraživanju publikovanom u literaturi. U okviru ovog eksperimenta vršena su testiranja sa različitim debljinama bloka stiropora u cilju određivanja njegovih optimalnih dimenzija. Razlika između

uporednih merenja dobijenih pomoću termovizijske kamere Varioscan 3021ST i temperaturnog senzora DS18B20, termički izolovanog blokom stiropora najoptimalnije debljine, daleko je manja u odnosu na prethodna dva eksperimenta i kreće se do 3°C. Iako je razlika više od tri puta manja u odnosu na komercijalni temperaturni senzor RTF4, ipak nije zanemarljiva, pa je neophodno vršiti dodatne eksperimente.

Eksperimentisanje sa različitim debljinama bloka stiropora ukazalo je na to da oblik TO-92 kućišta temperaturnog senzora DS18B20 otvara isuviše veliku mogućnost za stvaranje termalnog gradijenta. Naime, veoma mali deo TO-92 kućišta je u fizičkoj sprezi sa PV modulom čija se temperatura meri, a dosta veći deo je “otvoren”, odnosno izložen ambijentalnom uticaju. Mogućnost rešavanja navedenog problema ispitana je implementacijom termički izolovanog temperaturnog senzora DS18B20U, izvedenog u varijanti 8-pinskog SMD kućišta, koji, procentualno gledano, ima dosta manju otvorenu površinu u poređenju sa temperaturnim senzorom DS18B20 u TO-92 kućištu. Termička izolacija izvedena je identičnim blokom stiropora kao i u prethodna dva eksperimenta. Osnovna pretpostavka ove ideje je da bi manja slobodna površina temperaturnog senzora DS18B20U pružala manju mogućnost za generisanje termalnog gradijenta na kućištu senzora, usled čega bi merenja temperature PV modula bila tačnija. U sprovedenom eksperimentu, uporedna razlika između merenja termovizijske kamere Varioscan 3021ST i temperaturnog senzora DS18B20U manja je od 2°C, što je za 1°C manje nego u slučaju temperaturnog senzora DS18B20. Dakle, eksperimentalnim putem došlo se do potvrde inicijalne pretpostavke.

Nakon testiranja temperaturnog senzora RTF4 pristupilo se testiranju termički izolovanog temperaturnog senzora Pt100 pod oznakom DM-503 klase tačnosti B, proizvedenog od strane istog proizvođača kao i u slučaju RTF4 senzora, pri čemu je termička izolacija realizovana identičnim blokom stiropora kao i u prethodnim eksperimentima. Akvizicija merenja izvršena je pomoću specijalno realizovanog mernog sistema zasnovanog na programabilnom strujnom izvoru. Pre implementacije realizovanog sistema izvršeno je temeljno testiranje strujnog izvora kako bi se ispitala njegova mogućnost održavanja pobudne struje temperaturnog senzora Pt100 konstantnom. Odlični rezultati sprovedenog testiranja strujnog izvora kvalifikovali su realizovani sistem za sledeću fazu testiranja pomoću Fluke 9103 Dry-well temperaturnog kalibratora i multimetra Keysight 34410A. Razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću termovizijske kamere Varioscan 3021ST i temperaturnog senzora DM-503 daleko je manja nego u slučaju temperaturnog senzora RTF4 i kreće se do 1.2°C. Dakle, adekvatna termička izolacija temperaturnog senzora povećava

tačnost merenja temperature PV modula, što je sasvim očekivano, jer je termalni gradijent na kućištu temperaturnog senzora daleko manji nego u slučaju termički neizolovanog senzora. Činjenica da je u ovom eksperimentu zabeležena manja razlika između uporednih merenja nego u slučaju temperaturnog senzora DS18B20U, može se opravdati time da je senzor Pt100 fizički dosta manjih dimenzija.

Tokom primene termovizijske kamere u okviru sprovedenog istraživanja, javila se ideja da bi se problemi sa termalnim ekvilibrijumom kontaktnih temperaturnih senzora, odnosno njihovom termičkom izolacijom, mogli otkloniti primenom beskontaktnog temperaturnog senzora zasnovanog na merenju intenziteta infracrvenog zračenja koje emituje svako telo. Pored toga, montaža beskontaktnog temperaturnog senzora u potpunosti eliminiše probleme sa montiranjem temperaturnog senzora na PV modul, kao i sa prenosom toplote. Primena beskontaktnog temperaturnog senzora MLX90614 donosi još jednu prednost, a to je imunost na promene ambijentalne temperature, kao najvećeg uzročnika nepreciznosti kontaktnih temperaturnih senzora. Ispitivanje tačnosti merenja temperaturnog senzora MLX90614 za merenje temperature PV modula je, kao i u slučaju kontaktnih temperaturnih senzora, izvršeno u laboratorijskim i realnim uslovima rada pomoću termovizijske kamere Varioscans 3021ST, čime je ostvarena uniformnost dobijenih rezultata. Razlika između uporednih merenja dobijenih pomoću termovizijske kamere Varioscans 3021ST i temperaturnog senzora MLX90614 gotovo je tri puta manja u odnosu na analognu razliku merenja između termovizijske kamere i termički izolovanog Pt100 temperaturnog senzora, korišćenog u istraživanju sprovedenom u okviru ove disertacije. Važno je naglasiti da, na osnovu dostupne literature, do sada nije vršen nijedan sličan eksperiment koji uključuje beskontaktni temperaturni senzor. Serijom sprovedenih eksperimenata zapravo je nedvosmisleno potvrđena pretpostavka da su merenja dobijena beskontaktnim temperaturnim senzorom MLX90614 tačnija u odnosu na merenja dobijena pomoću kontaktnih rešenja korišćenih i analiziranih u okviru ove disertacije.

Imajući u vidu postavljene ciljeve na početku sprovedenog istraživanja, kao i rezultate do kojih se došlo, može se reći da ova disertacija ima više naučnih doprinosa:

- Eksperimentalnim putem dokazana je pretpostavka da postojeća kontaktna rešenja za merenje temperature PV modula nisu dovoljno tačna i da su pojedina čak krajnje loše izvedena.
- Potvrđena je poznata činjenica da adekvatna termička izolacija kontaktnog senzora povećava tačnost merenja temperature PV modula.

- Sa temperaturnim senzorom Pt100, projektovan je i realizovan sopstveni sistem za akviziciju merenja visoke tačnosti, koji je uspešno testiran i implementiran.
- Potvrđene su prednosti beskontaktnog načina merenja temperature PV modula, koje obuhvataju veću tačnost merenja, eliminisanje potrebe za termičkom izolacijom senzora i jednostavniju montažu istog na PV modul.

Budući planovi vezani za istraživanja u ovoj oblasti odnose se na razvoj matematičkog modela kojim bi se vršilo predviđanje temperature PV modula na osnovu ambijentalnih parametara. Validacija predloženog modela biće izvršena eksperimentalnim putem primenom realizovanog sistema zasnovanog na beskontaktnom temperaturnom senzoru MLX90614.

7. REFERENCE

- [1] T. A. H. E. D. D. H. A. O. Marcel Šúri, „Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries,“ *Solar Energy*, t. 81, br. 10, pp. 1295-1305, 2007.
- [2] P. F. Marco Raugei, „Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks,“ *Energy*, t. 34, br. 3, pp. 392-399, 2009.
- [3] M. G. Carvalho, „EU energy and climate change strategy,“ *Energy*, t. 40, br. 1, pp. 19-22, 2012.
- [4] I. O. M. L. I. M. J. C. J. S. D. G. D. A. D. L. S. Z. Morgan Bazilian, „Re-considering the economics of photovoltaic power,“ *Renewable Energy*, t. 53, pp. 329-338, 2013.
- [5] M. G. Y. M. Arnaudde La Tour, „Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models,“ *Energy*, t. 62, br. 1, pp. 341-348, 2013.
- [6] K. D. Swift, „A comparison of the cost and financial returns for solar photovoltaic systems installed by businesses in different locations across the United States,“ *Renewable Energy*, t. 57, pp. 137-143, 2013.
- [7] M. Y. Stefan Reichelstein, „The prospects for cost competitive solar PV power,“ *Energy Policy*, t. 55, pp. 117-127, 2013.
- [8] H. Chang, *Inventing Temperature, Measurement and Scientific Progress*, New York: Oxford University Press, 2004.
- [9] R. S. A. S. S. Mekhilef, „A review on solar energy use in industries,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 15, br. 4, pp. 1777-1790, 2011.
- [10] C. Fritts, „On a New Form of Selenium Photocell,“ *American Journal of Science*, t. 22, p. 465, 1883.
- [11] R. Ohl, „Light-sensitive electric device“. USA Patent US 2402662 A, 25 June 1946.
- [12] S. Millman, *A History of Engineering and Science in the Bell System: Physical sciences*, Bell Telephone Laboratories, 1983.

- [13] S. I. R. G. Bhubaneswari Parida, „A review of solar photovoltaic technologies,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 15, br. 3, pp. 1625-1636, 2011.
- [14] L. A. I. N. E. Z. L. El Chaar, „Review of photovoltaic technologies,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 15, br. 5, pp. 2165-2175, 2011.
- [15] S. H. Antonio Luque, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [16] T. M. L. C. Augustin McEvoy, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2012.
- [17] C. A. I. R.-S. Beatriz Galiana, „Comparison of 1D and 3D analysis of the front contact influence on GaAs concentrator solar cell performance,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, t. 90, p. 2589–2604, 2006.
- [18] A. S. S. A. H. M. Y. M. Abdulkadir, „Modeling and simulation based approach of photovoltaic system in simulink model,“ *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, t. 7, br. 5, pp. 616-623, 2012.
- [19] G. K. Singh, „Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review,“ *Energy*, t. 53, pp. 1-13, 2013.
- [20] V. Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems*, London: Earthscan, 2005.
- [21] J. R. G. E. R. F. Marcelo Gradella Villalva, „Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,“ *IEEE transactions on power electronics*, t. 24, br. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [22] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [23] M. A. K. E.-N. A. A.-O. M.R. AlRashidi, „A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells,“ *Solar Energy*, t. 85, br. 7, pp. 1543-1550, 2011.
- [24] Z. S. H. T. S. Kashif Ishaque, „Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model,“ *Simulation Modelling Practice and Theory*, t. 19, br. 7, pp. 1613-1626, 2011.
- [25] R. N. N. W. S. Chih-tang Sah, „Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics,“ *Proceedings of the IRE*, t. 45, br. 9, pp. 1228 - 1243, 1957.
- [26] S. L. A. A. A. C. A. B. E. D. Athina G. Gaglia, „Energy efficiency of PV panels under

- real outdoor conditionse - An experimental assessment in Athens, Greece,“ *Renewable Energy*, t. 101, pp. 236-243, 2017.
- [27] T. L. P. A. J. Carr, „A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates,“ *Solar Energy*, t. 76, br. 1-3, pp. 285-294, 2004.
- [28] W.-S. C. C.-C. Ting, „Measuring temperature dependence of photoelectric conversion efficiency with dye-sensitized solar cells,“ *Measurement*, t. 43, p. 1623–1627, 2010.
- [29] L. C. T. Markvart, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*, Oxford, Great Britain: Elsevier, 2005.
- [30] J. A. P. E. Skoplaki, „On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations,“ *Solar Energy*, t. 83, br. 5, pp. 614-624, 2009.
- [31] E. E. D. E. L. M. A. R. Gxasheka, „Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors,“ *Renewable Energy*, t. 30, pp. 611-620, 2005.
- [32] G. E. A. H. H. E.-G. H. M. S. Hussein, „Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations,“ *Energy Conversion and Management*, t. 45, pp. 2441-2452, 2004.
- [33] Y. S. T. H. M. T. K. Aika, „Ten years outdoor operation of silicon based photovoltaic modules at central latitude of Japan,“ *Renewable Energy*, t. 65, pp. 78-82, 2014.
- [34] E. K. F. V. Y. F. F. Mavromatakis, „Measuring and estimating the temperature of photovoltaic modules,“ *Solar Energy*, t. 110, pp. 656-666, 2014.
- [35] A. E. F. N. E. N. A. A. B. M. R. A. O. M. Akhsassi, „Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module,“ *Solar Energy Materials and Solar Cells*, t. In Press, 2017.
- [36] R. G. Ross, „Interface design considerations for terrestrial,“ u *Proceedings of the 12th IEEE photovoltaic specialists conference*, Baton Rouge, LA, 1976.
- [37] M. K. Fuentes, „A Simplified Thermal Model of Photovoltaic Modules,“ Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1985.
- [38] W. B. J. K. D.L. King, „Photovoltaic Array Performance Model,“ Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2004.
- [39] C. S. D. C. Piyatida Trinuruk, „Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand,“ *Renewable Energy*, t. 34, br. 11, pp. 2515-2523, 2009.

- [40] J.-M. Servant, „Calculation of cell temperature for photovoltaic modules from climatic data,“ u *Proceedings of the 9th Biennial Congress of the International Solar Energy Society-Intersol*, Montreal,, 1986.
- [41] D. Faiman, „Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules,“ *Progress in Photovoltaics*, t. 16, br. 4, pp. 307-315, 2008.
- [42] M. H. S. W. J. W. Michael Koehl, „Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, t. 95, br. 7, pp. 1638-1646, 2011.
- [43] J. L. B. M. C. Alonso Garcia, „Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations,“ *Renewable Energy*, t. 29, pp. 1997-2010, 2004.
- [44] G. GmbH, „Solarmodul Eurener MEPV 220/230“.
- [45] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, New York: Springer, 2004.
- [46] B. F. K. Kalantar-zadeh, *Nanotechnology-Enabled Sensors*, New York: Springer, 2008.
- [47] J. Carr, *Sensors & Circuits: Sensors, Transducers, & Supporting Circuits For Electronic Instrumentation Measurement and Control*, New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [48] M. S. V. Dusen, „Platinum-resistance thermometry at low temperatures,“ *Journal of the American Chemical Society*, t. 47, br. 2, p. 326–332, 1925.
- [49] J. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press LLC, Boca Raton, 1999.
- [50] J. H. H. Michiel A.P. Pertijs, *Precision Temperature Sensors in CMOS Technology*, Dordrecht: The Netherlands, 2006.
- [51] IMPAC Infrared GmbH, „Pyrometer-Handbook,“ IMPAC Infrared GmbH, Frankfurt am Main, 2004.
- [52] K.-D. Gruner, „Principles of non-contact temperature measurement,“ Raytek , 2003.
- [53] J. Janesch, „Two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes Sense for Your Application?,“ Keithley Instruments, Inc., Cleveland, 2013.
- [54] M. K. K. A. K. John K. Kaldellis, „Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece,“ *Renewable Energy*, t. 66, pp. 612-624, 2014.

- [55] M. J. K. B. M. T. J. Kurnik, „Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, t. 95, br. 1, pp. 373-376, 2011.
- [56] A. E. B. J. G. S. O. A. D. C. G. T. Vincent P. A. Lonij, „Field performance measurements of new and traditional PV technologies,“ u *World Renewable Energy Forum, WREF 2012*, Denver, Colorado, 2012.
- [57] M. F. M. R. S. T. M. C. L. C. M. L. L. Cristaldi, „Simplified method for evaluating the effects of dust and aging on photovoltaic panels,“ *Measurement*, t. 54, pp. 207-214, 2014.
- [58] F. J. M. J. V. M. C. R. M. Torres, „Online Monitoring System for Stand-Alone Photovoltaic Applications - Analysis of System Performance From Monitored Data,“ *Journal of Solar Energy Engineering*, t. 134, br. 3, pp. 034502-2, 2012.
- [59] T. k. N. k. A. B. B. Fatma Ahmadi, „Performances of PV Systems in Tunisia: Establishment of New Database,“ *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, t. 7, br. 3, pp. 1195-1204, 2017.
- [60] N. A. R. H. W. P. F. Shariff, „Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system,“ *Expert Systems with Applications*, t. 42, br. 3, p. 1730–1742, 2015.
- [61] A. D. G. G. M. Tina, „Remote monitoring system for stand-alone photovoltaic power plants: The case study of a PV-powered outdoor refrigerator,“ *Energy Conversion and Management*, t. 78, p. 862–871, 2014.
- [62] I. T. M. A.-D. A. T. Hegazy Rezk, „Performance of data acquisition system for monitoring PV system parameters,“ *Measurement*, t. 104, p. 204–211, 2017.
- [63] S. M. A. C. M. H. C. L. H. Belmilia, „Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization,“ *Renewable Energy*, t. 35, br. 7, pp. 1484-1492, 2010.
- [64] S. S. B. T. E. K. A. Chouder, „Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW,“ *Solar Energy*, t. 91, p. 337–349, 2013.
- [65] M. A.-H. N. A. C. J. A. H. A. J. R. S. P. G. F. Touati, „Investigation of solar PV performance under Doha weather using a customized measurement and monitoring system,“ *Renewable Energy*, t. 89, p. 564–577, 2016.
- [66] Labfacility, „RTF4“.

- [67] A. S. K. N. K. R. Eke, „Design and implementation of a low-cost multi-channel temperature measurement system for photovoltaic modules,“ *Measurement*, t. 45, br. 6, pp. 1499-1509, 2012.
- [68] R. H. G. T. T. H. T. S. K. C. V. H. M. J. Y. P. Gavin Mangeni, „Photovoltaic Module Cell Temperature Measurements using Linear Interpolation Technique,“ u *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Turin, Italy, 2017.
- [69] J. M. E. J. M. A. M. M. A. M. Bohorquez, „A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities,“ *Solar Energy*, t. 83, br. 6, pp. 883-890, 2009.
- [70] Dallas, „DS18B20“.
- [71] J. M. A. J. M. E. M. A. Martinez, „Temperature measurement in PV facilities on a per-panel scale,“ *Sensors*, t. 14, pp. 13308-13323, 2014.
- [72] M. V. J. M. B. J. A. J. A. V. M. Fuentes, „Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, t. 130, pp. 529-543, 2014.
- [73] M. T. M. Jankovec, „Intercomparison of temperature sensors for outdoor monitoring of photovoltaic modules,“ *Journal of Solar Energy Engineering*, t. 135, br. 3, pp. SOL-12-1178, 2013.
- [74] H. K. D. K. P. M. D. Bazilian, „Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system,“ *Renewable Energy*, t. 26, br. 3, pp. 449-461, 2012.
- [75] Microchip, „PIC18F2550 Datasheet“.
- [76] Labfacility, „DM-503“.
- [77] T. Instruments, „ADS1248 Datasheet,“ Dallas, Texas, 2016.
- [78] J. H. C. C. L. H. W. T. Sung, „Data fusion for PT100 temperature sensing system heating control model,“ *Measurement*, t. 52, pp. 94-101, 2014.
- [79] K. R. S. H. K. M. V. A. P. J. T. Devaraju, „Wireless Portable Microcontroller based Weather Monitoring Station,“ *Measurement*, t. 76, pp. 189-200, 2015.
- [80] Linear Technology, „LT3092 200mA 2-Terminal Programmable Current Source,“ 2009.
- [81] Microchip, „MCP4922“.
- [82] Microchip, „MCP3208“.

- [83] Melexis, „MLX90614“.
- [84] M. A. H. S. E. P. C. S. A. O'Shaughnessy, „Developing a wireless infrared thermometer with a narrow field of view,“ u *7th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources*, Reno, Nevada, USA, 2009.
- [85] K. R. N. N. T. S. T. Nunak, „Thermal image resolution on angular emissivity measurements using Infrared thermography,“ u *International multiconference of engineers and computer scientists (IMECS)*, Hong Kong, China, 2015.
- [86] S. P. N. C. R. S. M. P. R. Muniz, „Influence of field of view of thermal imagers and angle of view on temperature measurements by infrared thermovision,“ *IEEE Sensors Journal*, t. 14, br. 3, pp. 729-733, 2014.
- [87] R. d. S. M. S. P. N. C. C. B. D. Pablo Rodrigues Muniz, „Non-contact measurement of angle of view between the inspected surface and the thermal imager,“ *Infrared Physics & Technology*, t. 72, pp. 77-83, 2015.
- [88] D. M. I. J. Z. P. Uglješa Jovanović, „Temperature measurement of photovoltaic modules using non-contact,“ *Journal of Electrical Engineering & Technology*, t. 12, br. 2, pp. 904-910, 2017.

Biografija kandidata

Rođen je 01. marta 1985. godine u Zenici, a stalno nastanjen u Kruševcu. Osnovnu školu „Nada Popović“ i srednju „Mašinsko-elektrotehnička škola“ na smeru Automatika završio je u Kruševcu sa odličnim uspehom. Elektronski fakultet u Nišu upisao sam školske 2004/2005. god. na smeru Elektronika, a diplomirao 23. novembra 2010. god. sa prosečnom ocenom 8.14 i ocenom 10 na diplomskom radu na temu „Sistem za merenje temperature i relativne vlažnosti“.

Doktorske studije na Elektronskom fakultetu upisao je školske 2010/2011. god na smeru Elektronika i mikroracunarska tehnika. Od januara 2011. god. u sklopu studija, volonterski se angažuje na projektu „Razvoj, realizacija, optimizacija i monitoring mrežnog modularnog rotirajućeg fotonaponskog sistema snage 5 kW“ koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, evidencioni broj TR33035. Od juna 2012. god. na pomenutom projektu angažovan je u zvanju istraživač-pripravnik.

U periodu od 05. aprila 2011. god. do 30. aprila 2012. god radio je u Laboratoriji za primenjenu fiziku Elektronskog fakulteta u Nišu u zvanju stručni saradnik za naučno istraživački rad na realizaciji FP7 projekta „Joint research on various types of radiation dosimeters (RADDOS)“, evidencioni broj 207122.

Od 05. juna 2012. god. do 15. januara 2013. god. radio je u Istraživačko-razvojnom centru Sentronis AD u Nišu na razvoju sistema za merenje električne struje i magnetnog polja u zvanju istraživač-pripravnik.

Od 16. januara 2013. god. do 20. jula 2014. god. radio je u Inovacionom centru naprednih tehnologija u Nišu na realizaciji mernih sistema u sklopu projekta TR33035 najpre u zvanju istraživač-pripravnik, a od 04. decembra 2013. god. u zvanju istraživač-saradnik.

Od 21. jula 2014. god radi u Laboratoriji za termoviziju Elektronskog fakulteta u Nišu u zvanju stručni saradnik za naučno istraživački rad na projektu „Razvoj, realizacija, optimizacija i monitoring mrežnog modularnog rotirajućeg fotonaponskog sistema snage 5 kW“ koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, evidencioni broj TR33035.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

Beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula

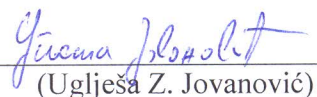
koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao/la na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio/la autorska prava, niti zloupotrebio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 22.03.2018. god.

Potpis autora disertacije:



(Uglješa Z. Jovanović)

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

Naslov disertacije: **Beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao/la za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, 22.03.2018. god.

Potpis autora disertacije:



(Uglješa Z. Jovanović)

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

Beskontaktni metod merenja temperature fotonaponskih modula

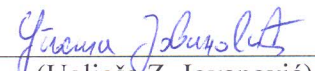
Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (**CC BY**)
2. Autorstvo – nekomercijalno (**CC BY-NC**)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (**CC BY-NC-ND**)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (**CC BY-NC-SA**)
5. Autorstvo – bez prerade (**CC BY-ND**)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (**CC BY-SA**)

U Nišu, 22.03.2018. god.

Potpis autora disertacije:



(Uglješa Z. Jovanović)