

# AUTOMATIZOVANI SISTEM ZA KARAKTERIZACIJU PT 100 OTPORNIH SONDI

Đorđe Novaković, Ivan Župunski, Zdravko Gotovac, Sanja Mandić, Dragan Pejić,  
Platon Sovilj, Nemanja Gazivoda

Ključne reči: karakterizacija Pt 100 otpornih sondi, automatizacija, merna nesigurnost,  
Python

## KRATAK SADRŽAJ

U radu je opisan automatizovani sistem za karakterizaciju Pt 100 otpornih sondi, realizovan u akreditovanoj metrološkoj laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Karakterizacija je unapređenje procesa etaloniranja namenjen temperaturnim sondama od platine više klase. Primenjene su metode karakterizacije uz upotrebu Callendar-Van Dusen interpolacione polinomijalne funkcije i interpolacione polinomijalne funkcije petog stepena. Motivacija za istraživanje i realizaciju automatizovanog sistema opisanog u radu ogleda se u potrebi za prenosom merne nesigurnosti referentne etalonske Pt 100 sonde (SPRT-Standard Platinum Resistance Thermometer) na radnu etalonsku Pt 100 sondu (PRT-Platinum Resistance Thermometer). Softver za automatizaciju i karakterizaciju je realizovan u Python programskom jeziku. Sprovedeno je vrednovanje merne nesigurnosti interpolacije uz primenu dobijenih koeficijenata interpolacione polinomijalne funkcije.

## AUTOMATED SYSTEM FOR CHARACTERISATION OF PT 100 RESISTANCE PROBES

Keywords: Pt 100 Resistance Probe Characterisation, Automatisation, Measurement Uncertainty, Python

## ABSTRACT

The paper describes an automated system for characterisation of Pt 100 resistant probes, realized in the accredited metrological laboratory of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad. Characterisation is an improved subset of the calibration process intended for higher class of temperature probes made out of platinum. Characterisation methods were applied using the Callendar-Van Dusen interpolation polynomial function and the fifth-degree interpolation polynomial function. The motivation for research and realization of the automated system described in the paper is reflected in the need to transfer the measurement uncertainty of the reference standard Pt 100 probe (SPRT-Standard Platinum Resistance Thermometer) to the working standard Pt 100 probe (PRT-Platinum Resistance Thermometer). The automation and characterisation software are implemented using the Python programming language. The evaluation of the measurement uncertainty of the interpolation was performed with the application of the obtained coefficients of the interpolation polynomial function.

## UVOD

Karakterizacija predstavlja metodu etaloniranja Pt 100 otpornih sonde srednjih do visokih performansi (tačnosti). Korišćenjem ove metode, prilikom svakog etaloniranja se uspostavlja nova relacija između otpornosti i temperature. Prvenstveno je, u našem slučaju, realizovano četvorožično merenje otpornosti ispitivane i etalonske sonde na većem broju temperaturnih tačaka. Zatim su određene vrednosti temperature etalonske sonde prema interpolacionoj polinomijalnoj funkciji datoj u sertifikatu o etaloniranju. Na kraju se pristupilo fitovanju eksperimentalno dobijenih podataka merenja uz upotrebu Callendar-Van Dusen interpolacione polinomijalne funkcije [1].

Laboratorija za metrologiju je proširila svoje mogućnosti etaloniranja u oblasti temperature nabavkom suvog temperaturnog kalibratora sa telom za izjednačavanje temperature Fluke 9142-p. Ovim je dobijena mogućnost da se korišćenjem procesne elektronike na prednjem panelu ovog kalibratora na, za to predviđen, konektor poveže jedan od radnih etalona – Fluke 884X-RTD Pt 100 temperaturna sonda i da se nakon karakterizacije ove sonde i određivanja potrebnih koeficijenata uz upotrebu Callendar-Van Dusen interpolacione polinomijalne funkcije omogući prikazivanje vrednosti temperature merene ovom sondom direktno na displeju suvog temperaturnog kalibratora [2,3].

Na ovaj način je omogućeno efikasnije izvođenje postupka etaloniranja temperaturnih sonde u Laboratoriji za metrologiju.

## ODABIR METODE KARAKTERIZACIJE

Uzimajući u obzir da Laboratorija za metrologiju ne raspolaže sa fiksnim temperaturnim tačkama, a pri tome ni sa fiksnom tačkom trojne tačke vode, kao ni odgovarajućim temperaturnim kalibratorima u kojima bi te tačke bile realizovane u samom startu se odustalo od primene ITS-90 temperaturne skale (internacionalna temperaturna skala iz 1990. godine) [6].

Odlučeno je da se primeni metod najmanjih kvadrata kako bi se odredila Callendar-Van Dusen interpolaciona polinomijalna funkcija data izrazom:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3], \quad (1)$$

gde  $R_t$  predstavlja otpornost temperaturne sonde na temperaturi  $t$ ,  $R_0$  otpornost na temperaturi  $0^\circ\text{C}$ , a  $A$ ,  $B$  i  $C$  predstavljaju koeficijente određene interpolacijom. Za temperature veće od  $0^\circ\text{C}$  koeficijent  $C$  se zanemaruje.

Takođe, koeficijenti Callendar - Van Dusen metode određeni na osnovu rezultata definisanih dokumentom [1], za temperature određene u tačkama  $0^\circ\text{C}$  i  $100^\circ\text{C}$ . Vrednosti koeficijenata  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$  dati su izrazima:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \\ \delta &= \frac{t_h - \frac{R_{th} - R_0}{R_0\alpha}}{\left(\frac{t_h}{100} - 1\right) \frac{t_h}{100}}, \\ \beta &= \frac{t_l - \left[\frac{R_{tl} - R_0}{R_0\alpha} + \delta \left(\frac{t_l}{100} - 1\right) \frac{t_l}{100}\right]}{\left(\frac{t_l}{100} - 1\right) \left(\frac{t_l}{100}\right)^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

gde  $R_{100}$  predstavlja otpornost temperaturne sonde na temperaturi  $100^\circ\text{C}$ ,  $R_{th}$  i  $R_{tl}$  predstavljaju vrednosti otpornosti na najvišoj  $t_h$  i najnižoj  $t_l$  temperaturi, redom.

Poznavanjem koeficijenata  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$  moguće je odrediti koeficijente  $A$ ,  $B$  i  $C$  iz izraza (1), kao:

$$\begin{aligned}
 A &= \alpha + \frac{\alpha\delta}{100} \\
 B &= -\frac{\alpha\delta}{100^2} \\
 C &= -\frac{\alpha\beta}{100^4}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

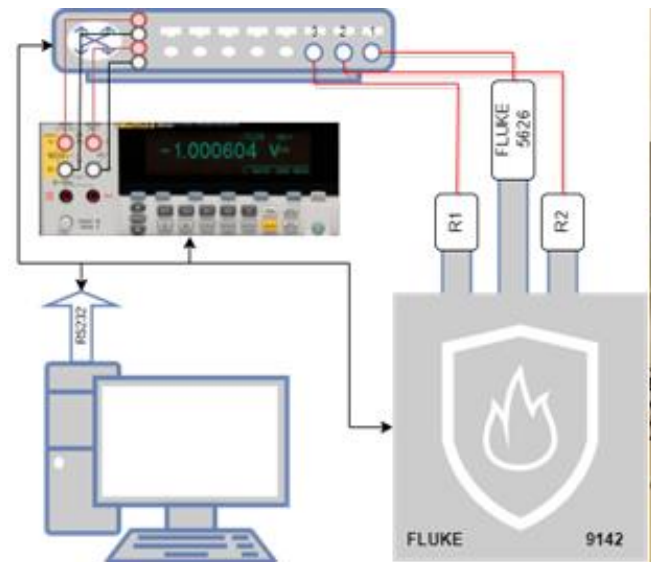
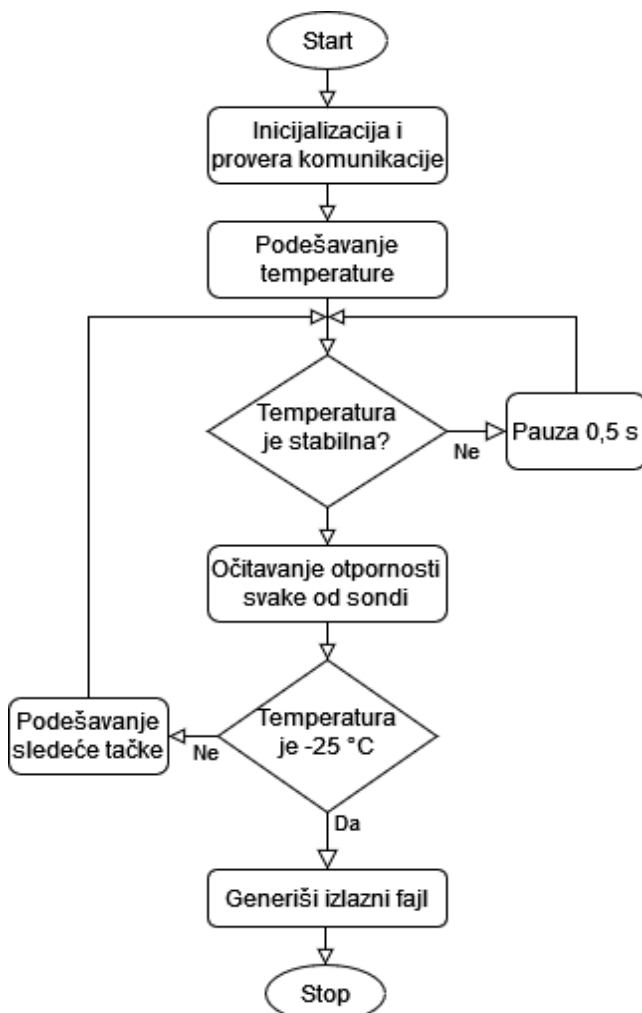
Kako bi se uporedili rezultati fitovanja dobijeni za Callendar - Van Dusen metode interpolirana je polinomijalna funkcija petog stepena date sledećim izrazom:

$$R_t = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 + ft^5. \tag{4}$$

## REALIZACIJA AUTOMATIZOVANOG SISTEMA ZA PRIKUPLJANJE PODATAKA

Kako bi se automatizovao proces karakterizacije radnih temperaturnih sonde (Fluke 884X) realizovan je eksperimentalni sistem prikazan na slici 1.

Tri Pt 100 sonde (etalonska Fluke 5626 i dve radne Fluke 884X sonde) uronjene su u telo za izjedačavanje temperature suvog temperaturnog kalibratora Fluke 9142. Otpornost svake od sonde se meri četvorožično korišćenjem digitalnog 6½ cifarskog multimetra Fluke 8846A. Pošto Fluke 8846A sadrži samo jedan AD konvertor neophodno je dodati i selektor kako bi se multipleksirao ulaz AD konvertora. U eksperimentalnoj postavci korišćen je selektor Isotech 954 koji ima mogućnost komunikacije korišćenjem RS232 komunikacionog protokola. Na prvi kanal selektora povezana je referentna sonda, dok su radne sonde u oznaci R1 i R2 povezane na treći i drugi kanal redom. Očitavanje otpornosti sa multimetra, kao i upravljanje temperaturnim kalibratorom realizovano je posredstvom RS232 protokola korišćenjem SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) komandi [4,5].



Slika 1. Prikaz eksperimentalne postavke

U programskom jeziku Python realizovana je aplikacija za očitavanje i upravljanje opisanom eksperimentalnom postavkom. Algoritam razvijene aplikacije prikazan je na slici 2.

Na početku aplikacije vrši se provera komunikacije slanjem komandi multimetru, temperaturnom kalibratoru i selektoru, nakon čega

Slika 2. Algoritam Python aplikacije

se vrši inicijalizacija pomenutih uređaja. Na temperaturnom kalibratoru zadavane su tačke temperature od 150 °C do -25 °C sa korakom -5 °C, gde je tačka 0 °C zadata dva puta. Temperaturni kalibrator ima mogućnost praćenja stabilnosti temperature koja je za potrebe ovog eksperimenta postavljena na 0,01 °C. Nakon podešavanja temperature uključuje se regulacija temperaturnog kalibratora, nakon čega aplikacija proverava da li je temperatura stabilna. Ako temperatura nije stabilna vrši se ponovna provera nakon 0,5 s. Kada je temperatura stabilna, selektor na izlaz prosleđuje prvi kanal sa koga se digitalnim multimetrom očitava vrednost otpornosti. Merenja se zatim vrše i na drugom i trećem kanalu gde se nalaze radne sonde. Između prebacivanja kanala i odabiranja izvršena je pauza u trajanju od 1 s. Za svaku temperaturnu tačku izvršeno je 10 merenja po svakoj Pt 100 sondi. Kada se podese i izvrši merenje za poslednju temperaturnu tačku (-25 °C) podaci se skladište u .csv dokument, nakon čega se zatvara komunikacija i aplikacija završava izvršavanje.

## POSTUPAK KARAKTERIZACIJE TEMPERATURNE SONDE

Na osnovu podataka preuzetih iz izlazne .csv datoteke, za 10 odbiraka svake od vrednosti otpornosti na zadanim temperaturama, određena je srednja vrednost. Na osnovu poznavanja srednjih vrednosti svake od sondi izvršena je karakterizacija i to:

1. Callendar - Van Dusen metodom provlačenjem interpolacione krive date izrazom (1),
2. Određivanjem koeficijenata  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$  na način definisan izrazom (2) i
3. interpolacijom polinomijalne funkcijom petog stepena.

Interpolacija Callendar - Van Dusen metodom realizovana je u programskom jeziku Python korišćenjem biblioteke *scipy* i funkcije *curve\_fit*. Ulazne parametre funkcije predstavljaju podaci o izmerenim temperaturama i otpornostima svake od radnih sondi, koji su dati u tabeli 1. Takođe, funkcija *curve\_fit* prima funkciju definisanu izrazom (1), na osnovu koje se vrši interpolacija. Funkcija kao izlazne parametre vraća koeficijente A, B i C. Slično su određeni parametri koeficijenata polinoma petog stepena definisanog u (4), s tim što se kao izlazni parametri dobijaju koeficijenti a, b, c, d, e i f.

Određeni su koeficijenti  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\delta$  poznavanjem otpornosti  $R_0$ ,  $R_{100}$ , kao i  $R_{th}$  i  $R_{tl}$  datih izrazom (2). Temperatura  $t_h$  predstavlja najvišu postavljenu temperaturu u suvom temperaturnom kupatilu (150 °C), na kojoj je sa referentne sonde očitana temperatura 149,978 °C, a  $R_{th1}$  i  $R_{th2}$  predstavljaju otpornosti radnih sondi i to 157,351  $\Omega$  i 157,368  $\Omega$ , redom. Temperatura  $t_l$  predstavlja najnižu postavljenu temperaturu (-25 °C) gde su  $R_{tl1}$  i  $R_{tl2}$  otpornosti radnih sondi i to 90,217  $\Omega$  i 90,193  $\Omega$ , redom. Kako bi se odredila otpornost  $R_0$  izvršena je linearna interpolacija između tačaka (-0,017 °C, 100,012  $\Omega$ ) i (0,033 °C, 100,021  $\Omega$ ) za prvu sondu, odnosno (-0,017 °C, 99,997  $\Omega$ ) i (0,033 °C, 100,016  $\Omega$ ) za drugu sondu. Na osnovu dobijenih pravih određena je vrednost  $R_0$  na temperaturi 0 °C i ona iznosi za prvu sondu 100,016  $\Omega$  i 100,004  $\Omega$  za drugu sondu. Na sličan način određena je vrednost  $R_{100}$  gde su korišćene tačke (99,977 °C, 138,522  $\Omega$ ) i (104,993 °C, 140,424  $\Omega$ ) za prvu sondu i (99,977 °C, 138,541  $\Omega$ ) i (104,993 °C, 140,442  $\Omega$ ) za drugu sondu. Dobijene vrednosti  $R_{100}$  na temperaturi 100 °C iznosi 138,531  $\Omega$  za prvu i 138,549  $\Omega$  za drugu sondu.

Tabela 1. Izmerene vrednosti otpornosti dve radne Fluke 884x sonde na temperaturama očitanim sa referentne Fluke 5626 sonde

T (°C)	$R_{tl}$ ( $\Omega$ )	$R_{t2}$ ( $\Omega$ )	T (°C)	$R_{t1}$ ( $\Omega$ )	$R_{t2}$ ( $\Omega$ )	T (°C)	$R_{t1}$ ( $\Omega$ )	$R_{t2}$ ( $\Omega$ )
149,978	157,351	157,368	84,969	132,816	132,832	19,971	107,805	107,799
144,983	155,484	155,500	79,974	130,910	130,926	14,974	105,862	105,853
139,988	153,614	153,630	74,975	129,000	129,016	9,976	103,915	103,904
134,991	151,740	151,756	69,970	127,086	127,101	4,978	101,965	101,953
129,997	149,863	149,879	64,971	125,171	125,185	0,033	100,021	100,016
125,010	147,986	148,004	59,969	123,252	123,264	-0,017	100,012	99,997

120,010	146,098	146,119	54,970	121,331	121,342	-5,002	98,064	98,046
115,004	144,210	144,229	49,970	119,407	119,416	-9,989	96,110	96,089
109,996	142,317	142,336	44,968	117,480	117,487	-14,978	94,151	94,129
104,993	140,424	140,442	39,967	115,551	115,555	-19,969	92,187	92,165
99,977	138,522	138,541	34,970	113,619	113,621	-24,974	90,217	90,193
94,966	136,621	136,637	29,970	111,684	111,683			
89,979	134,724	134,740	24,974	109,747	109,744			

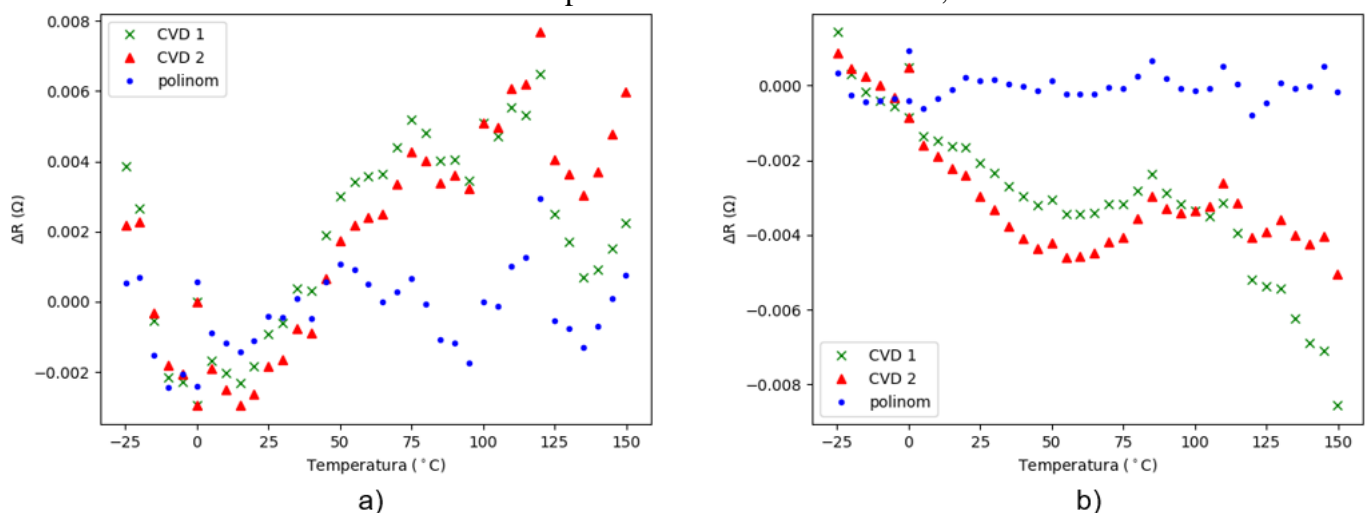
## REZULTATI KARAKTERIZACIJE I DISKUSIJA

Koeficijenti karakterizacije otporničkih Pt 100 sondi određeni interpolacijom funkcije Callendar – Van Dusen metode (metoda 1), određenih na osnovu dokumenta [7] (metoda 2) i interpolacijom polinoma petog stepena (metoda 3), prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Koeficijenti karakterizacije radnih sondi

		Radna sonda 1	Radna sonda 2
Metoda 1	$\alpha$	0,003851	0,003854
	$\delta$	1,4987	1,5524
	$\beta$	-0,2208	-0,27607
Metoda 2	$\alpha$	0,003851	0,003854
	$\delta$	1,4858	1,5402
	$\beta$	0,20663	-0,00591
Metoda 3	a	100,0192	100,0047
	b	0,390999	0,391456
	c	$-5,98393 \times 10^{-5}$	$-5,82742 \times 10^{-5}$
	d	$-1,7164 \times 10^{-8}$	$-5,1238 \times 10^{-8}$
	e	$4,39158 \times 10^{-10}$	$4,40885 \times 10^{-10}$
	f	$-1,67356 \times 10^{-12}$	$-1,13022 \times 10^{-12}$

Kako bi se uporedile metode određena su odstupanja interpoliranih od izmerenih vrednosti otpornosti. Rezultati za radnu sondu 1 i radnu sondu 2 prikazani na slici 3a i slici 3b, redom.



Slika 3. Odstupanja interpoliranih i izmerenih vrednosti otpornosti za: a) radnu sondu 1 i b) radnu sondu 2

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 3, moguće je uočiti da je apsolutna greška interpolacije ne veća od 9 mΩ, odnosno 25 mK. Apsolutne vrednosti grešaka i jedne i druge sonde kreću se u istim granicama. Takođe, nije uočena prednost karakterizacije sondi po metodi 1 u odnosu na metodu 2. Metoda 3 ima

najmanje granice aposultne greške jer je interpoliran polinom petog stepena, dok je za prethodne dve metode korišćena aproksimacija četvrtog stepena.

Na kraju su na osnovu određenih vrednosti koeficijenata karakterizacije u temperaturni suvi kalibrator Fluke 9412 unete vrednosti u EEPROM povezan u konektoru. U kalibrator je moguće uneti samo koeficijente dobijene po metodi 1 ili po metodi 2, dok ne postoji podrška za unos vrednosti koeficijenata karakteristične polinomne funkcije opisane metodom 3. Ovo omogućuje prikazivanje temperature radne sonde direktno na displeju Fluke 9412 suvog temperaturnog kalibratora.

## ZAKLJUČAK

U radu je uspešno realizovan sistem za automatizaciju postupka karakterizacije temperaturnih Pt 100 sondi. U sprovedenom eksperimentu vršena je karakterizacija dve radne Fluke 884X Pt 100 sonde, dok se kao referentna sonda koristi Fluke 5626. Eksperiment je sproveden u suvom temperaturnom kalibratoru Fluke 9142, kojim se upravlja pomoću računara. Na osnovu dobijenih vrednosti određeni su koeficijenti karakterizacije Callendar – Van Dusen metodom, kao i određivanjem polinomne funkcije.

Automatizacija procedure omogućila je minimizaciju greške usled ljudskog faktora i omogućila korišćenje novog sistema (suvi temperaturni kalibrator 9142 + Fluke Pt 100 884X) koja je omogućila daleko efikasniji i vremenski efektivniji pristup etaloniranju temperaturnih sondi u Laboratoriji za metrologiju.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u sklopu internog projekta Centra za metrologiju pod nazivom “Razvoj naučno-stručnih metoda u oblasti SMART koncepata u industriji, naučne i industrijske metrologije, neuronauka i biomedicinskih merenja primenom napredne metodologije i digitalne tehnologije”.

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku, telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a".

## LITERATURA

- [1] WIKA, *Callendar-Van Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers*, AW, 2014.
- [2] Hart Scientific Division, *914X Series Field Metrology Well User's Guide*, [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9142\\_43\\_ugeng0000.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9142_43_ugeng0000.pdf)
- [3] Fluke Corporation, *884X-RTD*, <https://us.flukecal.com/products/accessories/test-leads-probes-and-clips/884x-rtd>
- [4] Fluke Corporation, *8845A/8846A digital multimeter programming manual*, <https://docs.rs-online.com/620a/0900766b80802a16.pdf>
- [5] Isothermal Technology Limited, *8 Way Selector Switches Models 954 and 958*, <https://isotech.co.uk/products/8-way-selector-switches-models-954-and-958/>
- [6] J. V. Nicholas, D. R. White, *Traceable temperatures: an introduction to temperature measurement and calibration*, New York: Wiley, 2002.
- [7] ITS, *The Callendar – van Dusen coefficients*, Industrial Temperature Sensor, Ireland, 1999.