

Razvoj merno-informacionog sistema za podršku pri etaloniranju temperaturnih sonde

Aleksandar Dimitrijević, Platon Sovilj, *Member, IEEE*, Đorđe Novaković, *Member, IEEE*, Nemanja Gazivoda, *Member, IEEE*

Apstrakt— U ovom radu je opisan postupak automatizacije procesa etaloniranja temperaturnih sonde. Prikazan je način izrade aplikacije, implementacija određenih rešenja za sprečavanje grešaka, kao i algoritam po kojem se kod izvršava. Akcenat je stavljen na pojednostavljenju rada operatera. Uzete su u obzir konsultacije sa više korisnika čime se težilo optimalnom rešenju kako izgleda, tako i funkcionalnosti same aplikacije. Za realizaciju aplikacije korišćen je programski jezik Pajton sa QT frejmworkom.

Gljučne reči—proces etaloniranja; kalibracija; merenje temperature; automatizacija; temperaturne sonde.

I. UVOD

Primena savremenih uređaja u industriji, medicini, domaćinstvu, poljoprivredi i gotovo svim drugim oblastima zahteva precizno merenje kao i regulaciju temperature. Merenjem temperature dobijamo uvid i vršimo uticaj na rad uređaja, pa samim tim i na funkcionisanje sistema. Merenje temperature omogućava predviđanje havarije i pre nego što se ona desi. Zbog toga je jako bitno da uređaji budu permanentno održavani (kalibrisani, etalonirani), odnosno održavani tako da uvek daju relevantne rezultate.

Sam proces etaloniranja temperaturnih sonde zasniva se na očitavanju dobijenih vrednosti nakon uspostavljenog ravnotežnog stanja zadate temperature i temperaturne sonde. Imajući u vidu da je temperatura sporo promenljiva veličina u sam proces etaloniranja uvodi se automatizacija. Automatizacija olakšava rad korisniku na taj način što ne zahteva njegovo prisustvo tokom odvijanja procesa etaloniranja. Samim tim smanjuje verovatnoću za grešku i ubrzava proces.

II. TERMOPAROV I

Senzore temperature delimo na: ekspanzione, termootporničke, termistore, termoparove, termootporničke senzore od pt-žice, diodne itd. U radu se obrađuju termoparovi i termootpornički senzori od pt-žice koji imaju

Aleksandar Dimitrijević – Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: adimitrijevic22@gmail.com).

Platon Sovilj - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: nemanjagazivoda@uns.ac.rs).

Đorđe Novaković – Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs).

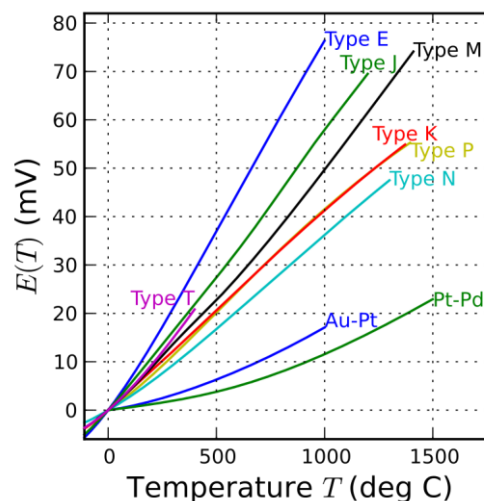
Nemanja Gazivoda – Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

najmasovnije primenu.

Termoparovi imaju veoma široku primenu u nauci i industriji. Koriste se u sušarama, silosima i u svim segmentima gde je neophodno precizno meriti temperature. Princip rada termoparova zasniva se na *Sibekovom efektu* koji opisuje nastajanje elektromotorne sile između dva različita metala ili njihovih legura. Dobijena elektromotorna sila je proporcijalna razlici između temperature krajeva. Za potrebe očitavanja temperature ne treba nikakav spoljni oblik pobude. Opseg u kojima mogu da mere temperature i izgled karakteristike strogo zavisi od materijala.

Termopar tipa K je najčešći termoelement u upotrebi sa osetljivošću od $28 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ do $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Jedna od mnogobrojnih prednosti je to što se može naći u širokom spektru opsega temperature. Funkcija kojom se opisuje zavisnost elektromotorne sile u odnosu na temperaturu zadata je od strane NIST-a (*National Institute of Standards and Technology*). Funkcija je aproksimirana polinomom devetog reda na punom opsegu temperature termopara tipa K (od -200°C do 1100°C).

$$T = d_0 + d_1v + d_2v^2 + \dots + d_7v^7 + d_8v^8 + d_9v^9 \quad (1)$$



Sl. 1. Grafički prikaz zavisnosti napona od temperature termoparova

Međutim primenom NIST-ovog polinoma sa deset koeficijenata dobija se promenljiva greška u zavisnosti od izabranog opsega. Ovako dobijena greška pravilnim odabirom koeficijenata u najboljem slučaju može se svesti na

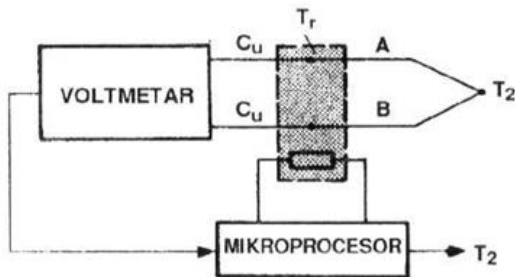
maksimalnu vrednost od 0,05 °C. S obzirom da se korišćenjem ovog polinoma ne dobija ista greška na svim opsezima temperature, pribegava se sužavanju opsega na potrebne relacije. Čime se greška znatno smanjuje.

Za proračun vrednosti elektromotorne sile u temperaturu biće korišćena racionalna aproksimacija polinomalne funkcije svedena na odnos dva polinoma manjeg reda umesto jednog polinoma većeg reda.

$$T = T_0 + \frac{(v-v_0)(p_1+(v-v_0)(p_2+(v-v_0)(p_3+p_4(v-v_0))))}{1+(v-v_0)(q_1+(v-v_0)(q_2+q_3(v-v_0)))} \quad (2)$$

Ubacivanjem koeficijenata u jednačinu vezanih za određeni temperaturni opseg greška se svodi na maskimalno moguće odstupanje od ±0,002 °C, što govori o tome da ova metoda daje višestruko tačnije rezultate merenja za specifičan temperaturni opseg.

Imajući u vidu prethodno navedene osobine termopara, za merenje koje će biti realizovano projektom neophodno je izvršiti kompenzaciju hladnog kraja termopara. Naziv metode je softverska kompenzacija hladnog kraja termopara. Preciznije rečeno u laboratorijskim uslovima moguće je obezbediti propisane uslove za realizaciju merenja, međutim sve više se pribegava merenju temperature hladnog spoja (referentnog kraja) sa drugim sensorom temperature (najčešće NTC ili PTC otpornikom). Nakon izmerene temperature hladnog spoja koristi se inverzna transformacija funkcije za proračun temperature na osnovu koje će se dobiti vrednost elektromotorne sile koju hladan spoj generiše. Kompenzacija se vrši samo ukoliko je temperature hladnog kraja različita od 0 °C.



Sl. 2. Šema za kompenzaciju hladnog kraja termopara

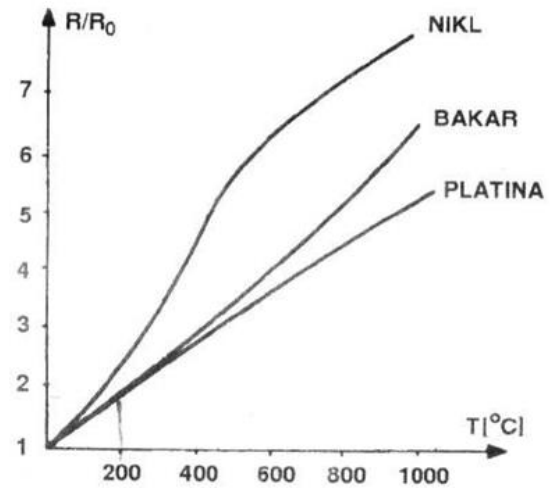
Formula za proračun napona hladnog kraja termopara:

$$v_{cj} = v_0 + \frac{(v-v_0)(p_1+(T_{cj}-T_0)(p_2+(T_{cj}-T_0)(p_3+p_4(T_{cj}-T_0))))}{1+(T_{cj}-T_0)(q_1+q_2(T_{cj}-T_0))} \quad (3)$$

gde je v_{cj} proračunati hladni kraj, T_{cj} temperature hladnog spoja, dok su T_0 , v_0 , p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , q_1 , q_2 koeficijenti koji zavise od temperaturnog područja merenja.

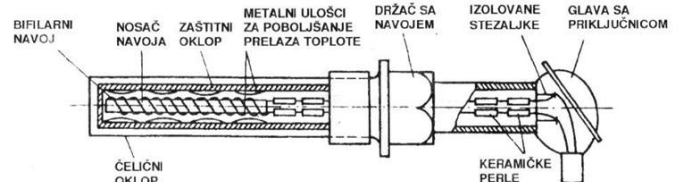
III. TERMOOTPORNIČKI SENZORI

Termootpornički senzori ili RTD senzori su otporni elementi koji menjaju otpor u zavisnosti od temperature. Zbog dobre karakteristike koriste se za precizno merenje temperature sa tačnošću ispod 0,1 °C. Senzor predstavlja obmotanu žicu oko keramičkog ili staklenog jezgra. Žica se izrađuje od platine čija je čistoća 99,999%, ali može biti i od nikla ili bakra.



Sl. 3. Izgled karakteristika termootporničkih senzora u zavisnosti od materijala

Vrednost otpora na temperaturi od 0 °C je 100 Ω ili 1000 Ω pa odatle nazivi Pt100, Pt 1000, Cu 100, Ni 100 itd. Opseg temperature u kojem se senzor može naći je od -200 °C do 850 °C (maskimalno 1500 °C), dok je opseg otpornosti od 10 Ω do 25 kΩ.



Sl. 4. Izgled termootporničkog senzora

Relacija između otpora platinskog senzora i temperature opisuje se *Callendar-Van Dusen* jednačinom (CDV).

Jednačina za proračun otpornosti u korelaciji sa temperaturom manjom od 0 °C:

$$R_{RTD} = R_0 (1 + AT + BT^2 + (CT^3 (T - 100))) \quad (4)$$

Jednačina za proračun otpornosti u korelaciji sa temperaturom većom od 0 °C:

$$R_{RTD} = R_0 (1 + AT + BT^2) \quad (5)$$

Za potrebe projekta neophodna je funkcija koja zavisi od izmerenog otpora. Za dobijanje te funkcije radi se inverzna transformacija jedne od jednačina.

IV. TEHNIČKO REŠENJE

A. Instrumentacija

Multimetar FLUKE 8846a je 6 ½ cifarski digitalni multimetar sa dvostrukim ekranom dizajniranim za potrebe laboratorije, rad na terenu i ubacivanje u sistemske aplikacije. Posедуje nekoliko interfejsa za komunikaciju kao što su RS-232, IEEE 488 i Ethernet protokol. Ethernet protokol ove uređaje čini idealnim kandidatima za precizna merenja i upotrebu u automatizovanim sistemima.

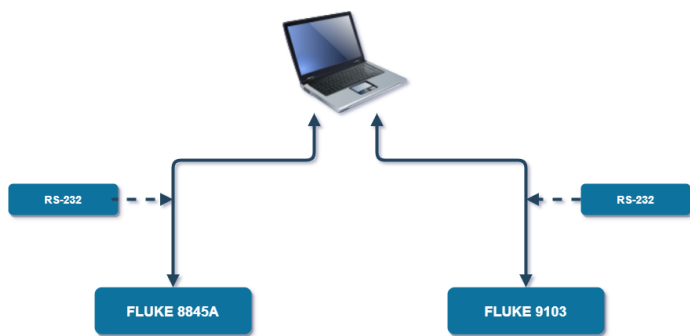
Karakteristike multimetra potrebne za projekat:

- Četvorožično merenje otpornosti
- Merenje jednosmernog napona
- RS-232 komunikacija

Suvi temperaturni kalibrator FLUKE 9103 može se koristiti kao prenosivi instrument za kalibraciju termoparova i RTD temperaturnih sondi. FLUKE 9103 je dovoljno male veličine za upotrebu na terenu takođe i dovoljno tačan za upotrebu u laboratoriji.

Karakteristike kalibratora potrebne za projekat:

- RS-232 protokol
- Univerzalni AC ulaz
- Kontrola brzine skeniranja temperature
- Mogućnost očitavanja u °C ili °F
- Pamćenje osam poslednjih zadatih vrednosti temperature



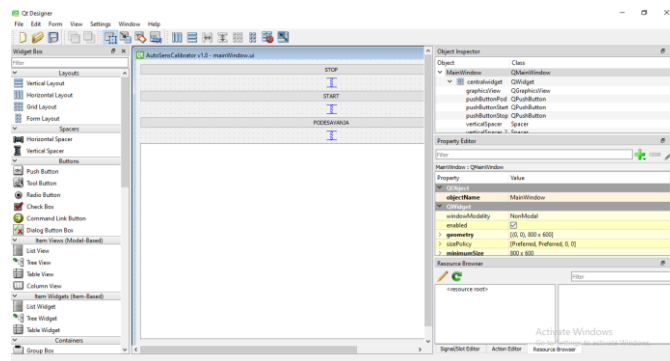
Sl. 5. Blok šema sistema

B. Pajton biblioteke

Za razvoj ove aplikacije korišćen je Pajton programski jezik koji je danas veoma popularan. Kroz Pajton se može izvršavati kod koji obavlja jednostavne operacije kao što je sabiranje brojeva pa sve do vrlo kompleksnih operacija koje opisuju ceo jedan sistem.

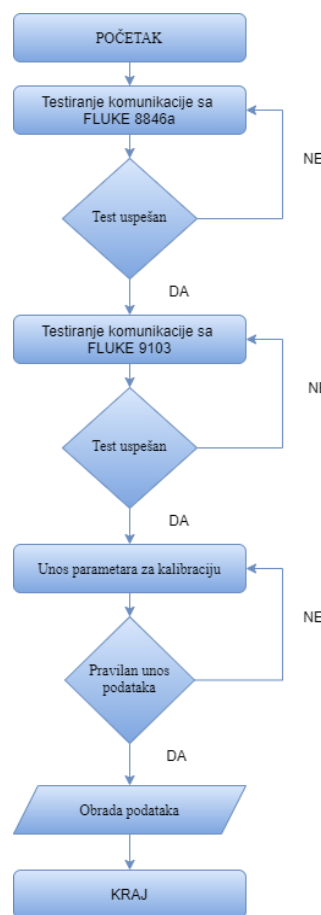
Pajton biblioteka PyQt5 omogućava korišćenje Qt GUI frejmvorka. Qt je napisan u C++ programskom jeziku. Kada se koristi u simbiozi sa Pajtonom daje znatnu uštedu vremena

tokom izrade korisničkog dela aplikacije, a pritom ne gubi na brzini koju pruža C++.



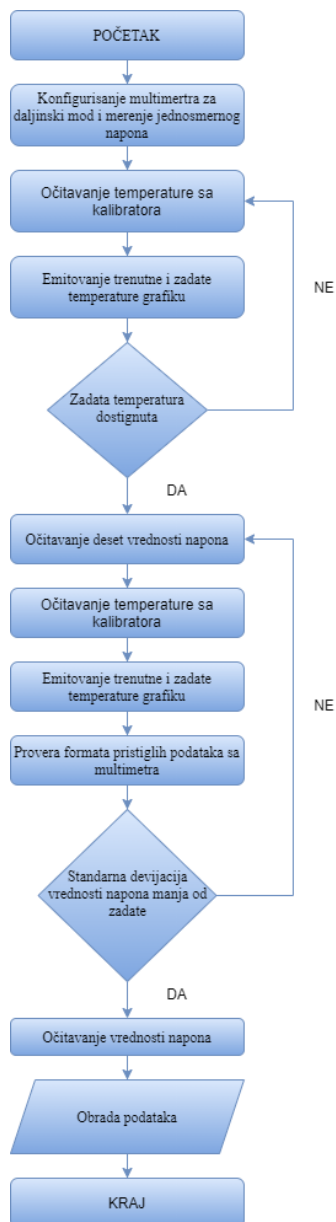
Sl. 6. Izgled glavnog prozora Qt dizajnera

C. Algoritam aplikacije



Sl. 7. Algoritam za podešavanje komunikacije i parametara kalibracije

Prikazani algoritam je uvodni algoritam za pravilnu konfiguraciju komunikacije i parametara kalibracije. Algoritam vodi korisnika kroz proces ne dozvoljavajući mu da preskoči neki korak i time na bilo koji način ugrozi merenje. Algoritam se izvršava pritiskom na taster „Podešavanja“. Sl. 10.

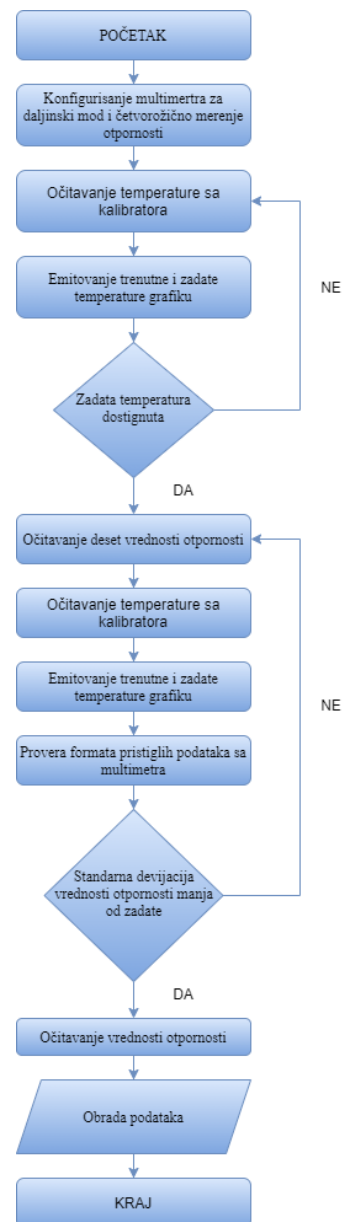


Sl. 8. Algoritam toka kalibracije za termopar tipa K

Prvi korak algoritma toka kalibracije za termopar tipa K prebacuje multimetar u daljinski režim rada i konfigurira ga za merenje jednosmernog napona sa automatskom promenom opsega i potrebnom rezolucijom. Tokom kalibracije aplikacija neprekidno dobija informaciju o trenutnoj temperaturi suvog temperaturnog kalibratora čiju vrednost emituje na grafiku.

Prvi uslov koji vodi ka tačnom očitavanju vrednosti napona koju termopar daje je stabilizacija temperature kalibratora. To se obezbeđuje na taj način što se u određenom vremenskom periodu traži informacija o njegovoj temperaturi. Ukoliko su tri uzastopne vrednosti očitane temperature jednake zadatoj algoritam se nastavlja, u suprotnom proces se ponovo izvršava.

Drugi uslov je provera standardne devijacije deset uzastopnih merenja vrednosti napona dobijenih u kratkom vremenskom periodu za zadato odstupanje.



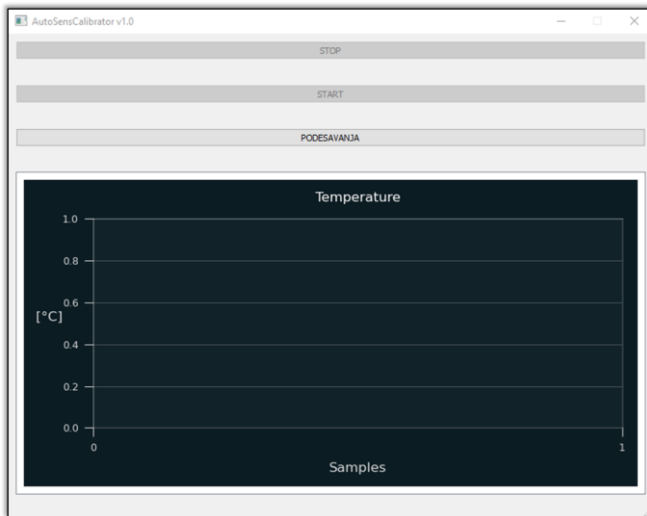
Sl. 9. Algoritam toka kalibracije za temperaturne sonde Pt100 i Pt 1000

Prvi korak algoritma toka kalibracije za RTD temperaturne sonde prebacuje multimetar u daljinski režim rada i konfigurira ga za četvorožično merenje otpornosti sa automatskom promenom opsega i potrebnom rezolucijom. Tokom kalibracije aplikacija neprekidno šalje upit za trenutnu vrednost temperature suvog temperaturnog kupatila koju emituje na grafik. Prvi uslov koji vodi ka tačnom očitavanju vrednosti otpornosti koju RTD daje je stabilizacija temperature kalibratora. To se obezbeđuje na taj način što se u određenom vremenskom periodu traži informacija o njegovoj temperaturi. Ukoliko su tri uzastopne vrednosti očitane temperature jednake zadatoj algoritam se nastavlja, u suprotnom proces se ponovo izvršava.

Drugi uslov je provera standardne devijacije deset uzastopnih merenja otpornosti dobijenih u kratkom vremenskom periodu za zadato odstupanje.

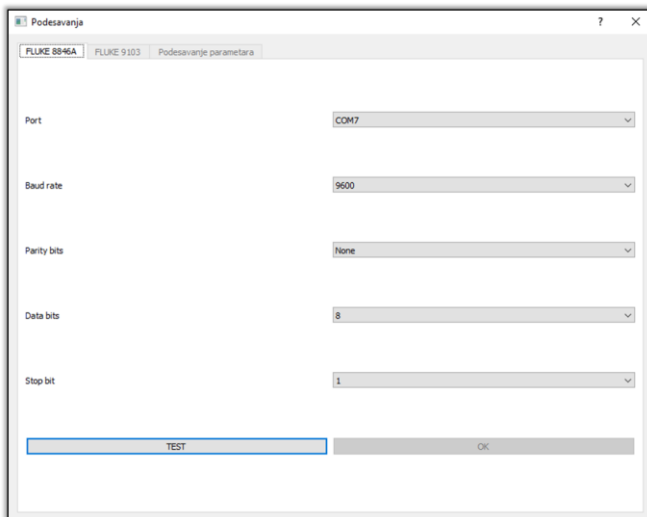
D. Izgled aplikacije

Korišćenjem metoda i podataka iz prethodnih poglavlja izrađena je aplikacija za kalibraciju temperaturnih senzora (AutoSensCalibrator).



Sl. 10. Početni prozor aplikacije

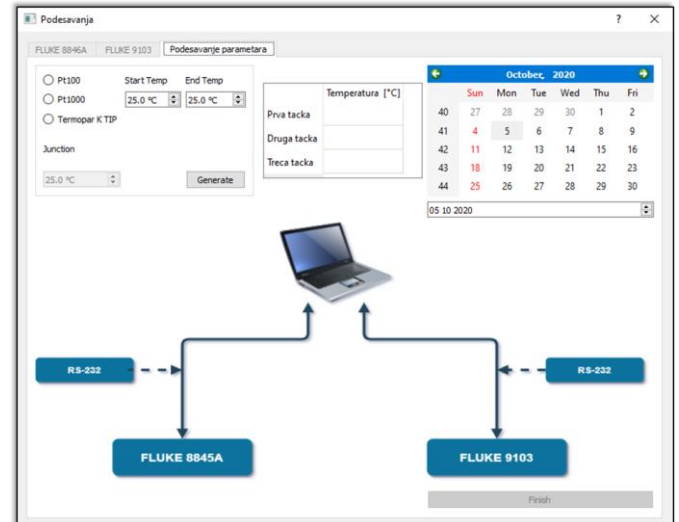
Na Sl. 10. prikazan je početni prozor i elementi koji se na njemu nalaze. Prozor se sastoji od tri tastera: „Start“, „Stop“ i „Podešavanja“. Takođe na istom prozoru je postavljen i grafik (grafik prikazuje trenutnu i zadatu temperaturu kao i kompletnu karakteristiku kalibracije).



Sl. 11. Podešavanje komunikacije sa uređajima

Sl. 11. prikazuje prvi prozor za podešavanje komunikacije sa uređajima. Na tabu FLUKE 8846a prikazana je mogućnost podešavanja parametara za komunikaciju (PORT, BAUD RATE, PARITY BITS, DATA BITS i STOP BIT) i taster „TEST“ za testiranje komunikacije. Pritisak na taster „OK“ se omogućava tek nakon uspešnog završetka testa.

Tab FLUKE 9103 prikazuje podešavanja komunikacije sa suvim temperaturnim kalibratorom FLUKE 9103. Prikazana je mogućnost podešavanja parametara za komunikaciju (PORT, BAUD RATE, PARITY BITS, DATA BITS i STOP BIT).



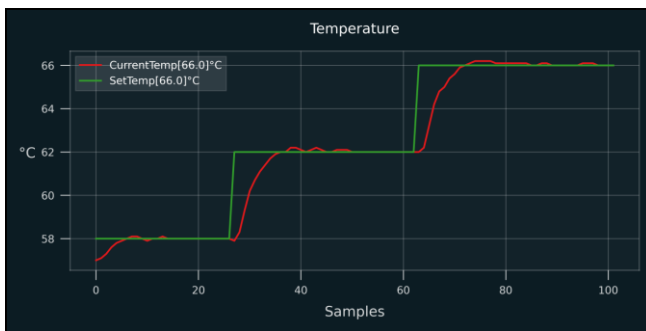
Sl. 12. Podešavanje parametara za kalibraciju

Na Sl. 13. prikazan je izbor tipa temperaturne sonde, temperaturnog opsega na kojoj će se vršiti kalibracija i vrednost temperature hladnog kraja. Nakon unosa, klikom na taster „Generate“ tabela se popunjava vrednostima tri zadate temperature. Klikom na „Finish“ taster završava se proces podešavanja i aplikacija je spremna za kalibraciju.

E. Primer izlazne datoteke

Etalon		OB		Obrada rezultata	
Ts °C	TOEems mV	TOEconv °C	G °C	U °C	
58	1.059	52.64	-5.36		
62	1.202	56.11	-5.89		
66	1.357	59.86	-6.14		
OE	Objekt etalovanja				
Ts	Temperatura etalonskog sistema				
TOEems	Pokazivanje OE u vrednosti elektromotorne sile				
TOEconv	Konverzijom dobijeno pokazivanje OE u °C				
G	Greška OE				
U	Proširena (k=2) merna nesigurnost etalovanja				
Merna nesigurnost iskazana u ovom Uverenju je proširena merna nesigurnost, gde je standardna merna nesigurnost pomnožena faktorom obuhvata k = 2, što za slučaj normalne raspodele greške odgovara verovatnoći od približno 95 %.					
- Kraj Uverenja -					

Sl. 12. Primer izlazne excel datoteke za termopar tipa K



Sl. 13. Primer izlazne datoteke grafičkog prikaza toka snimanja karakteristike

Nakon završetka kalibracije aplikacija generiše datoteku koja sadrži excel tabelu sa karakteristikama temperaturene sonde i grafikom celokupnog toka kalibrisanja.

V. ZAKLJUČAK

Izrada teme zahtevala je sukcesivan i kontinuiran rad. Sva poglavlja su uzročno posledično povezana. Bez kompleksnog i korektnog završetka poglavlja nije se moglo preći na sledeće. To ukazuje na činjenicu da je svako poglavlje na neki način celina za sebe i da zahteva ozbiljnu pažnju i obradu.

Projektovana aplikacija nalazi primenu u svakoj oblasti gde se primenjuju temperaturene sonde ovakvog tipa olakšavajući i davajući preglednost urađene kalibracije. Aplikaciju karakteriše lako rukovanje i kompatibilnost sa velikim brojem platformi.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se profesoru Platonu Sovilju, Đorđu Novakoviću i Nemanji Gazivodi na podršci i pomoći prilikom izrade ovog rada, kao i svim kolegama sa Katedre za električna merenja.

LITERATURA

- [1] <https://sh.wikipedia.org/wiki/Termopar>
- [2] <http://rdecontrol.com/thermocouples/rtds-101/temperature-calculations/>
- [3] <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/temperature-measurement/thermocouple/calibration-table#computing-cold-junction-voltages>
- [4] <https://people.vts.su.ac.rs/~gogolak/files/SzenzAkt/SR5SEN.pdf>
- [5] <https://srdata.nist.gov/its90/main/>
- [6] http://download.flukecal.com/pub/literature/884xa_umeng0300.pdf
- [7] https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2748044_6200_ENG_B_W_1.PDF?1kZ6Cz1sOihOLrBJgeT2Qn8Oot4YX2gM
- [8] FLUKE 8845A/8846A Digital Multimeter-Programers Manual
- [9] FLUKE 9103 Dry-Well User's Guide

ABSTRACT

This paper describes the automation of the temperature probes calibration process. Here are presented the method of application development, the implementation of certain solutions for error prevention, and the code execution algorithm. The paper focuses on simplifying the work of operators. In consultation with several users, the goal was to find the optimal solution for the appearance and the functionality of the application itself. Python programming language with QT framework was used for the realization of the application.