

Jedno rešenje problema nelinearnosti NTC termistora

Jelena Jovanović, Dragan Denić i Milan Simić

Apstrakt— U ovom radu predstavljena je nova metoda linearizacije NTC termistora. Novina ove metode ogleda se u primeni dva različita linearizaciona kola: serijsko-paralelnog otpornog razdelnika napona i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Na izlazu razdelnika napona, koji sadrži NTC termistor, dobija se pseudo-linearni napon. Pseudo-linearni napon se dalje linearizuje, i istovremeno prevodi u digitalni format, primenom dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Prvi stepen konverzije vrši deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor, dok drugi stepen konverzije obavlja linearni fleš A/D konvertor, koji povećava rezoluciju merenja, ali ne vrši linearizaciju. Nakon primene predložene metode linearizacije na Muratin termistor NTSD0KSV103FE1B0, za temperaturni opseg od -40 do 120°C , nelinearnost je smanjena na 0.024% , dok je za najuži od razmatranih opsega, tj. za opseg od 20 do 60°C , nelinearnost smanjena na 0.002% .

Ključne reči—linearizacija; NTC termistor; deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor; serijsko-paralelni otporni razdelnik napona.

I. UVOD

NTC termistor je temperaturno osetljivi otpornik sa negativnim temperaturnim koeficijentom, što znači da otpornost ovog senzora opada sa porastom temperature [1]. NTC termistori imaju široku primenu zahvaljujući tome što su isplativiji, robustniji, imuni su na električni šum, a uz sve to imaju širok radni opseg koji može da se prostire i od -80°C do 300°C [1]. Sve prednosti NTC termistora nad ostalim temperaturnim sensorima bivaju umanjene zbog veoma izražene nelinearne zavisnosti otpornosti ovog senzora od temperature koja se meri.

U cilju dobijanja informacije o merenoj temperaturi u digitalnom formatu, potrebno je obezbediti električni signal proporcionalan merenoj temperaturi. Iz tog razloga, termistor se uvek postavlja u električno kolo sa konstantnim naponskim ili strujnim izvorom. Napon na izlazu tog električnog kola zavisi, po nekom nelinearnom zakonu, od merene temperature jer i otpornost NTC termistora ima nelinearnu zavisnost od merene temperature. Linearizacija nelinearne zavisnosti pomenutog napona od merene temperature predmet je interesovanja inženjera i naučnika već duži niz godina. Kao rezultat rada na rešavanju ovog problema nastao je veliki broj

metoda linearizacije, a sa njima i mogućnost da se odabere najpodesniji metod za određenu primenu.

U referenci [2], autori su ispitivali primenu naponskih razdelnika, poput Vitstonovog mosta i serijsko-paralelnog otpornog razdelnika napona, za linearizaciju NTC termistora. Napon na izlazu ovih kola aproksimiran je primenom polinoma prvog i trećeg stepena. Aproksimacija se obavlja između uzetih kalibracionih tačaka (ulazna temperatura, izlazni napon). Numerički rezultati su pokazali da se najmanja greška aproksimacije dobija kada se izlazni napon serijsko-paralelnog razdelnika napona (koji sadrži NTC termistor koji se linearizuje) aproksimira polinomom trećeg stepena.

Jedno ekonomično rešenje za kompenzaciju nelinearnosti NTC termistora predstavlja aktivno analogno kolo predloženo u referenci [3]. Predloženo kolo se sastoji od stabilnog DC naponskog izvora, pojačavača jediničnog pojačanja, linearizacionog otpornika vezanog na red sa NTC termistorom i invertujućeg pojačavača. Pojačavač jediničnog pojačanja sadrži operacioni pojačavač kojim se umanjuje pobudni napon koji može da prouzrokuje samozagrevanje termistora. Kako je pobudni napon negativan, invertujući pojačavač na svom izlazu daje pozitivan napon. Na ovaj način, obezbeđeno je da sa porastom temperature raste i izlazni napon. Adekvatnim izborom linearizacionog otpornika može se obezbediti linearna zavisnost izlaznog napona od merene temperature. U konkretnom slučaju, nelinearnost nakon izvršene linearizacije iznosi $\pm 1\%$ za temperaturni opseg od 30 do 120°C .

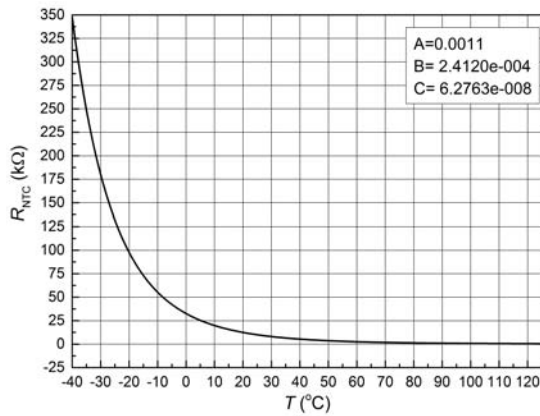
Još jedno kolo za linearizaciju NTC termistora, bazirano na kombinaciji serijsko-paralelnog razdelnika napona i operacionog pojačavača, predloženo je u referenci [4]. Primena ovog kola je još jedan primer da se linearizacija senzora može obaviti u analognom domenu, tj. pre A/D konverzije. U konkretnom primeru, NTC termistor je deo kola serijsko-paralelnog razdelnika napona, dok je uloga operacionog pojačavača da omogući povećanje osetljivosti NTC termistora i proširenje temperaturnog mernog opsega.

Oslanjajući se na zaključke izvedene analizom prethodno opisanih tehnika linearizacije NTC termistora, u ovom radu predložimo novu metodu linearizacije koja se bazira na kombinaciji jedne analogne tehnike (linearizacija se izvodi pre A/D konverzije) i jedne mešovite tehnike linearizacije (linearizacija se izvodi tokom A/D konverzije). Konkretno, predlaže se primena serijsko-paralelnog razdelnika napona i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. NTC termistor je deo kola serijsko-paralelnog razdelnika napona, dok se dvostepeni deo-po-deo linearni A/D konvertor, koji vrši linearizaciju izlaznog napona razdelnika, sastoji od dva fleša A/D konvertora.

Jelena Jovanović – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: jelena.jovanovic@elfak.ni.ac.rs).

Dragan Denić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.denic@elfak.ni.ac.rs).

Milan Simić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: milan.simic@elfak.ni.ac.rs).



Sl. 1. Zavisnost otpornosti od temperature za NTC termistor NTSD0XV103FE1B0.

Zavisnost otpornosti NTC termistora R_{NTC} od temperature T može se modelovati, tj. aproksimirati takozvanom tro-parametarskom Steinhart-Hart jednačinom [1, 5]. Steinhart-Hart jednačina ima sledeći oblik:

$$R_{NTC} = \exp \left[\left(x - \frac{y}{2} \right)^3 - \left(x + \frac{y}{2} \right)^3 \right], \quad (1)$$

$$y = \frac{\left(A - \frac{1}{T} \right)}{C}, \quad (2)$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{B}{3 \cdot C} \right)^3 + \left(\frac{y}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

gde je T temperatura u $^{\circ}K$, R_{NTC} je otpornost termistora u Ω , dok su A , B i C parametri Steinhart-Hart jednačine. U cilju određivanja parametara Steinhart-Hart jednačine najmanje tri kalibracione tačke, tj. parovi vrednosti (otpornost termistora, temperatura) moraju biti poznati.

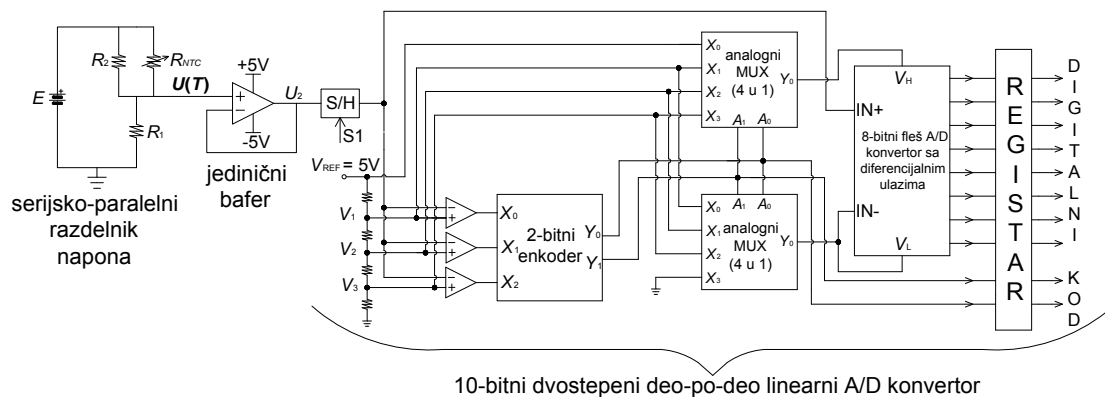
U ovom radu, kao primer, uzeli smo NTC termistor oznake NTSD0XV103FE1B0 proizvođača Murata [6]. Radni opseg ovog termistora prostire se od -40 do $125^{\circ}C$. Primenom tri

kalibracione tačke ($-30^{\circ}C$, $179.973 \text{ k}\Omega$), ($40^{\circ}C$, $5.353 \text{ k}\Omega$) i ($110^{\circ}C$, $0.527 \text{ k}\Omega$), parametri Steinhart-Hart jednačine, odnosno modela, su izračunati i iznose: $A=0.0011$, $B=2.412 \cdot 10^{-4}$ i $C=6.2763 \cdot 10^{-8}$. Proračun ovih koeficijenata izvršili smo primenom LabVIEW virtuelnog instrumenta koji se poziva u okviru složenijeg virtuelnog instrumenta za simulaciju predloženog mernog sistema za merenje temperature i generisanje numeričkih rezultata. Funkcionalna zavisnost otpornosti od temperature za NTC termistor NTSD0XV103FE1B0 proizvođača Murata, odnosno njegova prenosna funkcija, prikazana je na Sl.1.

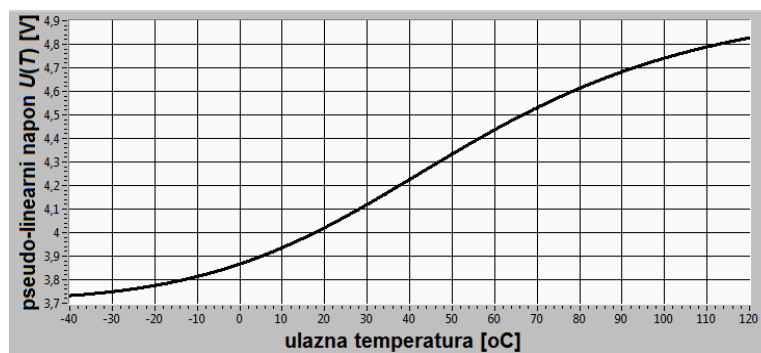
II. KOLO ZA LINEARIZACIJU NTC TERMISTORA

Na Sl. 2 je prikazano celokupno kolo za linearizaciju NTC termistora R_{NTC} . Kolo se sastoji iz serijsko-paralelnog razdelnika napona, čiji je deo NTC termistor koji linearizujemo, i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Za proračun vrednosti otpornika R_1 i R_2 serijsko-paralelnog razdelnika potrebni su sledeći parametri [1]: disipaciona konstanta termistora $C_d=2.1 \text{ mW}/^{\circ}C$, otpornost termistora na $40^{\circ}C$ $R_{NTC}(40^{\circ}C)=5.353 \text{ k}\Omega$, greška merenja temperature prouzrokovana samozagrevanjem NTC termistora $\Delta T=0.05^{\circ}C$ [1, 2, 7], i temperaturna osetljivost materijala od koga je napravljen termistor, koja iznosi $\beta=3900^{\circ}K$ [6]. Proračunate vrednosti otpornika R_1 i R_2 iznose: $R_1=14.99 \text{ k}\Omega$ i $R_2=5.22 \text{ k}\Omega$. Izlazni napon, odnosno napon na otporniku R_1 , $U(T)$, je pseudo-linear sa prevojnom tačkom na $40^{\circ}C$, a kako bi se eliminisala njegova nelinearnost potrebno je još jedno kolo za linearizaciju. Dakle, u cilju linearizacije pseudo-linearnog napona $U(T)$ isti se dovodi na ulaz kola dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. U prvom stepenu ovog kola koristi se deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor čija je prenosna funkcija deo-po-deo linearna aproksimacija funkcije koja je inverzna funkciji $U(T)$ [8, 9, 10, 11]. Upravo ovaj A/D konvertor obavlja linearizaciju pseudo-linearnog napona, jer je njegova prenosna funkcija (funkcija kvantizacije) inverzna zavisnosti $U(T)$. Drugi stepen konverzije obavlja linearni fleš A/D konvertor sa diferencijalnim ulazima i u njime se ne vrši linearizacija.

Zavisnost $U(T)$, za opseg od -40 do $120^{\circ}C$, prikazana je na Sl. 3. Nelinearnost napona $U(T)$ je naročito izražena na granicama posmatranog temperaturnog opsega.



Sl. 2. Predloženo kolo za linearizaciju NTC termistora sa serijsko-paralelnim razdelnikom napona i dvostepenim deo-po-deo linearnim A/D konvertorom.



Sl. 3. Pseudo-linearni napon $U(T)$ koji se dovodi na ulaz dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora u cilju dalje linearizacije.

Osim pomenutog, biće ispitana još četiri temperaturna opsega simetrična u odnosu na 40°C . Još se može primetiti da je ova zavisnost najlinearnija u okolini prevojne tačke, tj. u okolini temperature od 40°C . Upravo promenom temperature prevojne tačke, koja utiče na vrednosti otpornika R_1 i R_2 , može se podešavati temperaturni opseg u kome je zavisnost $U(T)$ najlinearnija. To znači da će u odabranom opsegu (oko prevojne tačke) greška merenja biti najmanja.

Između serijsko-paralelnog razdelnika napona i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora nalazi se pojačavač jediničnog pojačanja čiji je zadatak da izvrši prilagođenje po impedansi između ova dva kola za linearizaciju NTC termistora. Prvi i drugi stepen A/D konverzije mogu imati različite kombinacije rezolucija od N_1 i N_2 bita, respektivno, ali je na Sl. 2 prikazan slučaj kada je rezolucija prvog stepena 2-bitna, a drugog 8-bitna. Ulazni opseg 2-bitnog deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora određen je maksimalnim naponom koji se dobija na izlazu serijsko-paralelnog razdelnika napona. Iz pomenutog razloga referentni napon za prvi stepen A/D konverzije iznosi $V_{\text{REF}}=5\text{V}$, jer i maksimalna vrednost napona $U(T)$ nije veća od 5V . Fleš A/D konvertor iz prvog stepena ima rezoluciju od 2 bita, pa su samim tim za njegovu realizaciju neophodna četiri otpornika različitih vrednosti kojima se podešavaju referentni naponi na ulazima tri komparatora. Ovi referentni naponi (V_1 , V_2 i V_3), još nazvani break naponi [8, 9, 10, 11], predstavljaju granice linearnih segmenata koji čine deo-po-deo linearnu prenosnu funkciju fleš A/D konvertora iz prvog stepena. Preciznije, kao posledica nelinearnosti funkcije kvantizacije prvog A/D konvertora, pomenuti break naponi su neuniformno raspoređeni unutar ulaznog opsega tog A/D konvertora. Ovi naponi odgovaraju temperaturama koje su dobijene podelom temperaturnog opsega na $n_1=2^{N_1}$ podopsega jednake širine. Spoljne granice temperaturnog opsega se ne uzimaju u obzir pri proračunu break napona. Tako na primer, ako je $N_1=2$ bita, temperaturni opseg od -40 do 120°C se deli na $n_1=4$ podopsega koji se prostiru od -40 do 0°C , od 0 do 40°C , od 40 do 80°C i od 80 do 120°C . Break naponi se određuju samo za granične temperature od 0 , 40 i 80°C . Dakle, za rezoluciju od 2 bita potrebna su tri break napona jer je toliki i broj komparatora koji učestvuju u konstrukciji 2-bitnog fleš A/D konvertora.

Fleš A/D konvertor iz prvog stepena određuje unutar kog

segmenta se nalazi odmerak pseudo-linearnog napona $U(T)$. Granice pronađenog segmenta predstavljaju granice ulaznog opsega linearnog fleš A/D konvertora sa diferencijalnim ulazima iz drugog stepena. Dva analogna multiplexera 4×1 , koja se nalaze između dva fleš A/D konvertora, selektuju granice ulaznog opsega drugog fleš A/D konvertora. Ulazni opseg drugog, linearnog fleš A/D konvertora podeljen je na $n_2=2^{N_2}$ uniformne ćelije jednake širine. Fleš A/D konvertor iz drugog stepena umanjuje grešku kvantizacije unetu u prvom stepenu i istovremeno pronalazi ćeliju, unutar definisanog segmenta, kojoj pripada odmerak napona $U(T)$. Na ovaj način povećana je rezolucija merenja, pa je i tačnost merenja temperature povećana. Digitalne reprezentacije segmenta i ćelije unutar koje se nalazi odmerak zajedno predstavljaju konačni digitalni izlaz dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Za slučaj prikazan na Sl. 2 izlazna digitalna reč je dužine 10-bitna.

III. REZULTATI SIMULACIJA I NJIHOVA ANALIZA

Do rezultata koji su ostvareni primenom predložene metode linearizacije NTC termistora došli smo simulacijom celokupnog mernog sistema u softverskom paketu LabVIEW [12]. U okviru virtuelnog instrumenta realizovan je sub-virtuelni instrument za određivanje parametara Steinhart-Hart modela NTC termistora i generisanje napona $U(T)$. Simuliran je i rad dvostepenog A/D konvertora. Dakle, u cilju generisanja numeričkih rezultata, čije bi vrednosti potvrdile efikasnost predložene metode linearizacije NTC termistora, ispitano je pet temperaturnih opsega simetričnih u odnosu na 40°C . Takođe, za svaki temperaturni opseg posmatran je uticaj različitih vrednosti rezolucija N_1 i N_2 , prvog i drugog stepena A/D konverzije, respektivno, na nelinearnost NTC termistora nakon linearizacije. Preciznije, za procenu efikasnosti predložene metode linearizacije NTC termistora koriste se vrednosti apsolutne greške merenja $\Delta T[{}^{\circ}\text{C}]$, i nelinearnost termistora $\delta T[\%]$, koje su definisane sledećim izrazima, respektivno:

$$\Delta T[{}^{\circ}\text{C}] = |T_{\text{iz}} - T_{\text{ul}}| \quad (4)$$

$$\delta T[\%] = \frac{\Delta T_{\text{max}}[{}^{\circ}\text{C}]}{\text{širina opsega}[{}^{\circ}\text{C}]} \cdot 100\% \quad (5)$$

TABELA I
 NELINEARNOST TERMISTORA [%] NTSD0XV103FE1B0 PROIZVOĐAČA MURATA NAKON LINEARIZACIJE PREDLOŽENIM KOLOM

	Nelinearnost δT [%]								
	Bez linearizacije N_1 [bit] N_2 [bit]	Sa linearizacijom N_1 [bit] N_2 [bit]							
Opseg [°C]	$N_1=0$ $N_2=16$	$N_1=2$ $N_2=10$	$N_1=2$ $N_2=12$	$N_1=2$ $N_2=14$	$N_1=4$ $N_2=8$	$N_1=4$ $N_2=10$	$N_1=4$ $N_2=12$	$N_1=6$ $N_2=8$	$N_1=6$ $N_2=10$
-40-120	12.904	4.531	4.523	4.521	0.368	0.359	0.358	0.026	0.024
-20-100	8.408	2.753	2.744	2.742	0.224	0.215	0.214	0.016	0.014
0-80	4.277	1.303	1.294	1.291	0.111	0.103	0.101	0.009	0.007
10-70	2.608	0.757	0.747	0.745	0.069	0.060	0.058	0.007	0.004
20-60	1.321	0.354	0.346	0.343	0.038	0.029	0.027	0.006	0.002

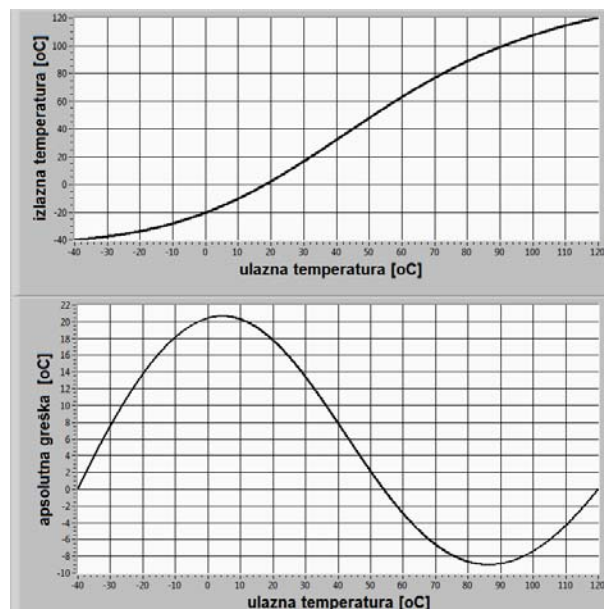
U prethodnim izrazima figurišu sledeći parametri: T_{iz} je vrednost koja se dobija na izlazu dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora, odnosno to je izmerena vrednost temperature, T_{ul} je vrednost na ulazu u NTC termistor, odnosno to je stvarna (tačna) vrednost temperature koja se meri, ΔT_{max} je maksimalna apsolutna greška merenja u datom opsegu merene temperature, i širina opsega predstavlja širinu trenutno posmatranog temperaturnog opsega. Vrednosti nelinearnosti termistora za različite temperaturne opsege i rezolucije N_1 i N_2 , date su u Tabeli I.

Druga kolona u Tabeli I odnosi se na slučaj kada u linearizaciji NTC termistora ne učestvuje prvi stepen dvostepenog A/D konvertora, odnosno kada je $N_1=0$. Posmatrajući rezultate može se zaključiti da nelinearnost opada sa sužavanjem posmatranog temperaturnog opsega. Međutim, tek kada se u proces linearizacije uključi i A/D konvertor manifestuje se uticaj rezolucija N_1 i N_2 na vrednosti razmatranih parametara. Kao što se moglo i očekivati, sa porastom rezolucije N_1 prvog stepena A/D konverzije, kojim se obavlja linearizacija pseudo-linearnog napona sa izlaza serijsko-paralelnog razdelnika, dolazi do značajnijeg smanjenja nelinearnosti. S druge strane, sa porastom rezolucije N_2 drugog stepena A/D konverzije kojim se redukuje greška kvantizacije uneta u prvom stepenu, ne dolazi do značajnijeg smanjenja nelinearnosti termistora. I u ovom slučaju sa suženjem temperaturnog opsega dolazi do smanjenja nelinearnosti termistora. Na primer, kada su $N_1=2$ bita i $N_2=12$ bita, nelinearnost za najširi temperaturni opseg iznosi 4.523%. Zatim, kada su $N_1=2$ bita i $N_2=14$ bita, i za isti temperaturni opseg, nelinearnost iznosi 4.521%, tj. neznatno je smanjena, dok za slučaj kada su $N_1=4$ bita i $N_2=10$ bita, nelinearnost iznosi 0.359%, odnosno 12 puta je niža u odnosu na slučaj kada su $N_1=2$ bita i $N_2=12$ bita. Povećanjem rezolucije N_1 na 6 bita i smanjenjem rezolucije N_2 na 8 bita, nelinearnost se smanjuje 14 puta u poređenju sa slučajem kada su $N_1=4$ bita i $N_2=10$ bita. U najboljem slučaju, tj. za $N_1=6$ bita i $N_2=10$ bita, nelinearnost iznosi 0.024%. Iz prethodnog se može zaključiti da sa povećanjem rezolucije u prvom stepenu i smanjenjem rezolucije u drugom stepenu, tako da ukupna rezolucija ostane ista, dolazi do značajnog

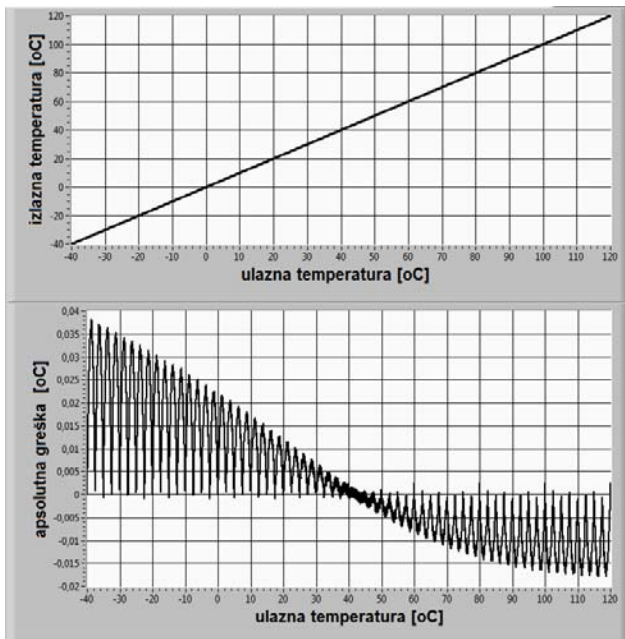
smanjenja nelinearnosti. Takođe, pri svakom uvećanju rezolucije N_1 za 2 bita, dolazi do smanjenja apsolutne greške merenja za više od 10 puta.

Svi prethodno izvedeni zaključci dokazuju da prvi stepen konverzije ima značajniji doprinos u eliminisanju nelinearnosti termistora i popravljajući tačnosti merenja. Međutim, sa povećanjem rezolucije N_1 povećava se broj referentnih, tj. break napona koje je potrebno proračunati i podesiti. Takođe se i kompleksnost kola povećava jer je potreban veći broj komparatora koji čine fleš A/D konvertor. Iz prethodno navedenih razloga, analiza je rađena samo za slučajeve u kojima rezolucija N_1 nije bila veća od 6 bita.

Na Sl. 4 i Sl. 5 su za dva različita slučaja prikazane prenosne funkcije celog mernog sistema (od ulaza u NTC termistor do izlaza iz dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora) i apsolutne greške merenja za temperaturni opseg od -40 do 120°C.



Sl. 4. Prenosna funkcija mernog sistema i apsolutna greška merenja za temperaturni opseg od -40 do 120°C pre linearizacije u dvostepenom deo-po-deo linearnom A/D konvertoru ($N_1=0$ bita, $N_2=16$ bita).



Sl. 5. Prenosna funkcija mernog sistema i apsolutna greška merenja za temperaturni opseg od -40 do 120°C nakon linearizacije u dvostepenom deo-po-deo linearnom A/D konvertoru ($N_1=6$ bita, $N_2=10$ bita).

Na Sl. 4 prikazan je slučaj kada su rezolucije $N_1=0$ bita i $N_2=16$ bita, odnosno kada nema linearizacije u dvostepenom deo-po-deo linearnom A/D konvertoru, dok je na Sl. 5 prikazan slučaj kada su $N_1=6$ bita i $N_2=10$ bita, odnosno kada se linearizacija izvodi primenom 6-bitnog deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora iz prvog stepena konverzije. Za pomenuti temperaturni opseg, nakon linearizacije (Sl. 5), maksimalna apsolutna greška merenja iznosi 0.038°C . Jasno se može uočiti da sa smanjenjem širine opsega, pa čak i onda kada nema linearizacije primenom dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora ($N_1=0$ bita i $N_2=16$ bita), dolazi do "peglanja" prenosne funkcije, a razlog zbog čega se to dešava je taj što je i pseudo-linearni napon $U(T)$ linearniji u blizini prevojne tačke. Zato se sa sužavanjem opsega, tj. približavanjem temperaturi od 40°C , linearnost popravlja i samo sa primenom serijsko-paralelnog razdelnika napona. Takođe, promenom položaja prevojne tačke, može se birati onaj deo temperaturnog opsega u kome se želi najveća tačnost merenja.

Za najuži od posmatranih temperaturnih opsega, tj. za opseg od 20 do 60°C , i rezolucije $N_1=6$ bita i $N_2=10$ bita maksimalna apsolutna greška iznosi 0.001°C . Poređenja radi, u referenci [2], u kojoj je za linearizaciju NTC termistora korišćen serijsko-paralelni otporni razdelnik napona u opsegu temperatura od 10 do 39°C , minimalna vrednost greške merenja nakon linearizacije iznosila je 0.04°C . Dakle, iako se radi o užem temperaturnom opsegu u referenci [2], minimalna vrednost apsolutne greške merenja je 40 puta veća od maksimalne apsolutne greške koju smo mi ostvarili primenom predložene metode linearizacije.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu predložili smo novu metodu za linearizaciju NTC termistora koja podrazumeva primenu serijsko-paralelnog otpornog razdelnika napona i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Pomenuta kombinacija dve različite tehnike linearizacije (analogna i mešovita) predložena je sa ciljem smanjenja nelinearnosti prenosne funkcije NTC termistora i povećanja tačnosti merenja temperature. Jedna od najznačajnijih prednosti predložene metode je to što se paralelno sa linearizacijom obavlja i digitalizacija rezultata merenja, čime se štedi na vremenu obrade signala, potrošnji energije, kompleksnosti i troškovima realizacije mernog sistema.

Povećanjem rezolucija fleš A/D konvertora popravlja se linearnost NTC termistora i smanjuje se greška merenja temperature. Međutim, povećanje rezolucije prvog, tj. deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora dovodi do povećanja kompleksnosti linearizacionog kola. Preciznije, konvertor veće rezolucije ima veći broj komparatora, što znači da je broj referentnih, tj. break napona, koje je potrebno proračunati i podesiti (trimovanjem otpornika) veći.

Težeći uspostavljanju kompromisa između rezolucije i tačnosti merenja sa jedne strane, i kompleksnosti linearizacionog kola sa druge strane, primenili smo serijsko-paralelni otporni razdelnik napona i 16-bitni dvostepeni A/D konvertor i pritom dobili sledeće rezultate: za najširi temperaturni opseg od -40 do 120°C maksimalna apsolutna greška merenja iznosi 0.038°C , dok je nelinearnost 0.024% , i za najuži temperaturni opseg od 20 do 60°C maksimalna apsolutna greška merenja iznosi 0.001°C , dok je nelinearnost 0.002% . Poređenja radi, u referenci [2], u kojoj je za linearizaciju NTC termistora u opsegu od 10 do 39°C upotrebljen serijsko-paralelni razdelnik napona, minimalna vrednost greške merenja iznosila je 0.04°C . Navedeni rezultati potvrđuje činjenicu da je cilj da se poveća tačnost NTC termistora, primenom predloženog kola za linearizaciju, postignut.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (evidencioni broj projekta je TR 32045).

LITERATURA

- [1] J. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Boca Raton, USA: CRC Press LLC, 1999.
- [2] S. B. Stankovic, P. A. Kyriacou, "Comparison of thermistor linearization techniques for accurate temperature measurement in phase change materials," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 307, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [3] A. R. Sarkar, D. Dey, S. Munshi, "Linearization of NTC thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 12, pp. 4621–4626, 2013.
- [4] A. Kumar, M. L. Singlab, A. Kumarb, J. K. Rajputc, "POMANI- Mn_3O_4 based thin film NTC thermistor and its linearization for overheating protection sensor," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 156, no. 2015, pp. 150–162, 2015.
- [5] J. S. Steinhart, S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors," *Deep-Sea Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 497–503, 1968.

- [6] NTSD0XV103FE1B0 Temperature Sensor Lead Insulation Type. Datasheet for Murata.
<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1870999.pdf>.
- [7] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, New York, USA: Springer Science+Business Media, 2010.
- [8] G. Bucci, M. Faccio, C. Landi, "New ADC with piecewise linear characteristic: case study-implementation of a smart humidity sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, no. 6, pp. 1154-1166, 2000.
- [9] A. J. Lopez-Martin, M. Zuza, A. Carlosena, "A CMOS A/D converter with piecewise linear characteristic and its application to sensor linearization," *Analog. Integr. Circ. S.*, vol. 36, no. 1, pp. 39-46, 2003.
- [10] D. Živanović, J. Lukić, D. Denić, "A Novel Linearization Method of Sin/Cos Sensor Signals Used for Angular Position Determination," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1437-1445, 2014.
- [11] J. Lukić, D. Živanović, D. Denić. "Linearization Method for Angular Position Sensors," Proc. XII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2014, Niš, Srbija, pp. 229-232, 12-14 November, 2014.
- [12] V. Drndarević, *Akvizicija mernih podataka pomoću personalnog računara*, Beograd, Srbija: Institut za nuklearne nauke "Vinča", 1999.

ABSTRACT

In this paper, a novel method for the NTC thermistor linearization is presented. The novelty of this method is reflected in the application of two different linearization circuits: a serial-parallel resistive voltage divider, and a two-stage piecewise linear A/D converter. At the output of the voltage divider, which contains the NTC thermistor, a pseudo-linear voltage is obtained. The pseudo-linear voltage is further linearized, and at the same time converted into a digital format, using the two-stage piecewise linear A/D converter. The first conversion stage is performed by the piecewise linear flash A/D converter, while the second conversion stage is performed by the linear flash A/D converter, which increases the measurement resolution but does not perform the linearization. After the application of proposed linearization method on the Murata's NTSD0XV103FE1B0 thermistor, for a temperature range from -40 to 120°C, the nonlinearity is reduced to 0.024%, while for the narrowest of the observed ranges, spanning from 20 to 60°C, the nonlinearity is reduced to 0.002%.

One solution of the NTC thermistor non-linearity problem

Jelena Jovanović, Dragan Denić and Milan Simić