

Dvokoračna segmentna linearizacija kao deo mernog lanca termopara

Dragan Živanović, Milan Simić, Milica Stojanović i Dragan Denić

Apstrakt—Rad prikazuje implementaciju dvokoračne segmentne metode linearizacije za smanjenje greške aproksimacije termoparova. U prvom delu je opisana softverska obrada mernog signala pretvarača sa termoparom. Evaluaciju linearizacionih funkcija i analizu aproksimacionih grešaka vrši softverski paket virtualne instrumentacije LabVIEW. Osnovni princip ove metode je da se apscisa prenosne funkcije prvo transformiše pomoću tabela za segmentnu linearizaciju na takav način da se opseg ulaznih vrednosti proširuje na opsezima na kojima je nelinearnost karakteristike značajna, a zatim se vrši standardna linearizacija po segmentima. Na ovaj način, primena dvokoračne metode linearizacije na jednakim segmentima ima isti efekat kao i primena linearizacije na nejednakim segmentima. Za date primere prenosnih funkcija termoparova, predložena metoda daje značajno manju grešku aproksimacije, uz jednaku potrošnju memorije za linearizacione tabele. Jednostavna softverska implementacija ovog dvokoračnog metoda linearizacije omogućava da se primenjuje u mernim pretvaračima mikrokontrolera male procesorske snage, umesto standardne segmentne linearizacije.

Ključne reči— Dvokoračna linearna aproksimacija, prenosna funkcija termopara, smanjenje aproksimacione greške, virtualna instrumentacija.

I. UVOD

Nelinearna prenosna karakteristika senzora u inteligentnim mernim pretvaračima može se kompenzovati brojnim metodama zasnovanim na hardveru i softveru. Polinomna aproksimacija je standardni metod koji se koristi za linearizaciju prenosne funkcije termoparova. Jednačine pogodne za linearizaciju prenosne karakteristike svakog tipa termopara definiše NIST i BIPM u obliku polinomne aproksimacije osmog ili većeg reda, za više (do 5) segmenta linearizacije, sa veoma malom greškom aproksimacije [1, 2]. Ako je dozvoljena greška linearizacije manja od 1%, a prenosna funkcija izrazito nelinearna, potreban je veći broj segmenata kako bi se prenosna karakteristika linearizovala, pa samim tim i polinom većeg stepena, ukoliko se koristi polinomna aproksimacija [4]. Dozvoljena greška termopara,

dobijena u procesu proizvodnje i prouzrokovana starenjem pri upotrebi, je značajno veća [3], preko 1 °C. To znači da je za linearizaciju karakteristike moguće uspešno koristiti i polinomne funkcije [4], ili splajn funkcije [5] nižeg reda.

U radu [6] predložena je metoda progresivne polinomne kalibracije, gde se polinom određuje direktno, na osnovu mernih kalibracionih tačaka, što je posebno pogodno ukoliko prenosna karakteristika nije poznata. Sve nesavršenosti mernog sistema se zatim kompenzuju u istoj proceduri.

U nekoliko radova [7, 8] su, kao metode za linearizaciju, predložene veštačke neuronske mreže (Artificial Neural Networks - ANN). ANN metode su pogodne jer je moguće uzeti u obzir nesavršenost mernog sistema, kao i veličine koje utiču na merenje, poput temperature hladnog kraja [9].

Ukupni troškovi memorije i procesorske snage su veoma važni aspekti pri izboru optimalne metode linearizacije za određene primene. Za izračunavanje optimalnih koeficijenata linearizacije na osnovu poznatih funkcija ili kalibracionih tačaka, može se koristiti personalni računar (PC). Ako se za izračunavanje koriste resursi PC - a, kompleksnost algoritma ne predstavlja ograničenje. S druge strane, merni pretvarači obično imaju značajno male resurse u vidu memorije i procesorske snage, pa je veoma važno izabrati metodu za linearizaciju koja ne zahteva veliku memoriju i procesorsku snagu [10-12]. Kada mikroprocesor ima mogućnost povezivanja više ulaza ili direktnog multipleksiranja većeg broja senzora na ulazu, još je važnije odabrati metodu linearizacije koja zahteva mali broj mikroprocesorskih ciklusa za izračunavanje.

U mnogim aplikacijama može biti korisno da se izračunavanja vrše u celobrojnoj matematici, što je kompatibilno sa linearnom segmentnom aproksimacijom. Implementacijom aritmetike sa podacima koji se pamte u formatu sa pokretnim zarezom, može se zauzeti i do 1 KB memorije, što je dovoljno memorije da se zapamti do 500 segmenata u linearizacionoj tabeli sa celobrojnim tipom podataka [12]. Kako je proračun brži ukoliko se koristi celobrojni tip podataka, segmentna linearizacija koja koristi cele brojeve je efikasnija za korišćenje u odnosu na polinomnu aproksimaciju, i pogodna za implementaciju u mikrokontroleru za različite tipove senzora. Takođe je pogodna i za dvodimenzionalnu segmentnu linearizaciju (površinska), kada konačni rezultat zavisi od dve promenljive.

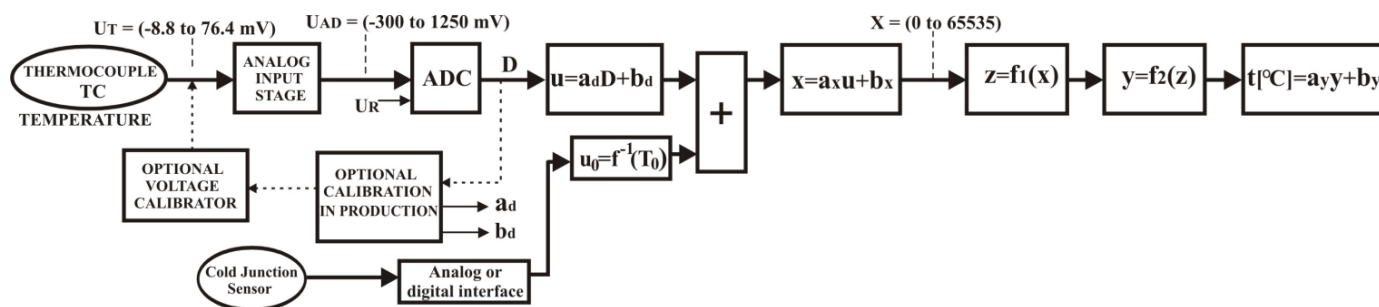
Linearizaciona metoda se u mnogim radovima kombinuje sa praktičnim implementacijama mernog sistema pretvarača

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

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

Milica Stojanović - Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: milica.stojanovic@elfak.ni.ac.rs).

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



Sl. 1. Protok signala unutar memnog pretvarača sa termoparom

[6, 7, 9, 11, 14].

Radovi [11, 15] daju dobru komparativu analizu primena većeg broja metoda linearizacije. U radovima [15, 16, 17] prikazana je hardverska implementacija segmentne linearizacije.

Pri poređenju metoda, pored tačnosti aproksimacije, treba uporediti potrošnju memorijskog prostora i brzinu odziva, a sve ovo dosta zavisi i od posmatrane prenosne karakteristike.

II. ULAZNI STEPEN TERMOPARA

Termoparovi se često koriste kao temperaturni senzori, zbog brzog odziva, robusne konstrukcije i temperaturnog opsega od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, značajno šireg nego kod otpornih i poluprovodničkih senzora [18, 19]. Nedostatak primene termoparova jeste nelinearnost prenosne karakteristike, kao i uticaj temperature hladnog kraja termopara na merenje.

Dve metalne žice, različitih termoelektričnih karakteristika su spojene na jednom kraju, koji je izložen visokim temperaturama, obično mnogo višim od drugog, otvorenog, kraja. Naponska razlika između žica na otvorenom kraju će zavistiti od materijala od kojeg su napravljene žice, kao i od temperature na oba kraja termopara. Tabela sa termoelektričnim naponima standardnih termoparova se daje pod pretpostavkom da se otvoreni kraj termoparova nalazi na temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izvan oblasti sa visokim temperaturama, krajevi termopara mogu se produžiti korišćenjem jeftinijih kompenzacionih kablova, koji će omogućiti da se termopar poveže sa elektronikom. Kako bi se merila temperatura na vrućem kraju, temperatura na otvorenom ("hladnom") kraju mora biti poznata. [9, 20]. Za rešavanje problema kompenzacije hladnog kraja, u praktičnim realizacijama se dodaje temperaturni senzor sa boljom tačnošću, ali sa mnogo manjim temperaturnim opsegom, na primer, otporni senzori PT100, ili poluprovodnički senzor TMP275, povezan pomoću I2C digitalnog interfejsa.

Dotadni senzor temperature mora biti smešten veoma blizu hladnog kraja termopara, po mogućstvu u termoizolovanoj komori sa konektorom. Tipičan postupak linearizacije prenosne karakteristike termopara uključuje konverziju temperature hladnog spoja T_0 , na napon U_0 , korišćenjem funkcije $U_0 = f(T_0)$. U sledećem koraku, napon U_0 treba dodati izlaznom naponu termopara U_T , zatim se inverznom funkcijom dobijeni napon konvertuje u temperaturu pomoću funkcije $T = f^{-1}(U_T + U_0)$ [9, 20]. Zbog nelinearnosti

karakteristike termopara, direktno dodavanje temperature hladnog kraja inverznoj funkciji napona termopara nije tačno, jer traženo $T = f^{-1}(U_T + f(T_0))$ nije isto što i $T = f^{-1}(U_T) + T_0$.

Blok dijagram na Sl. 1. prikazuje algoritam softverske obrade signala u mernom pretvaraču, pogodnom za merenje sa različitim tipovima termopara. Odnos između rezultata ADC konverzije i ulaznog napona je isti za sve tipove termopara. Uobičajeno, u toku procesa proizvodnje pretvarača, neophodno je podesiti koeficijente a_d i b_d kako bi se izvršila kalibracija. Nakon toga, vrednost napona termopara treba uvećati za vrednost napona hladnog kraja senzora. Kako bi se pojednostavio postupak linearizacije za različite tipove termoparova i smanjila greška u celobrojnim proračunima, signal se zatim skalira tako da pokrije maksimalan opseg korišćenjem neoznačenih int16 promenljivih, od 0 do 65535, za opseg napona za izabrani tip termopara i temperaturni opseg.

Sledeći korak je primena inverzne funkcije za određeni tip termopara. U datom blok dijagramu, ova inverzna funkcija je podeljena na funkcije f_1 i f_2 , prema predloženoj dvokoračnoj metodi linearizacije. Konačno, izračunata celobrojna vrednost temperature u opsegu od 0 do 65535 se konvertuje u konačni rezultat u formatu sa fiksnom decimalnom tačkom, a koeficijenti a_y i b_y (različiti za svaki tip termopara) obezbeđuju da rezultat bude predstavljen u obliku $yyyy.y[^{\circ}\text{C}]$.

III. METOD DVOKORAČNE LINEARNE APROKSIMACIJE PRIMENJEN NA STANDARDNE TIPOVE TERMOPAROVA

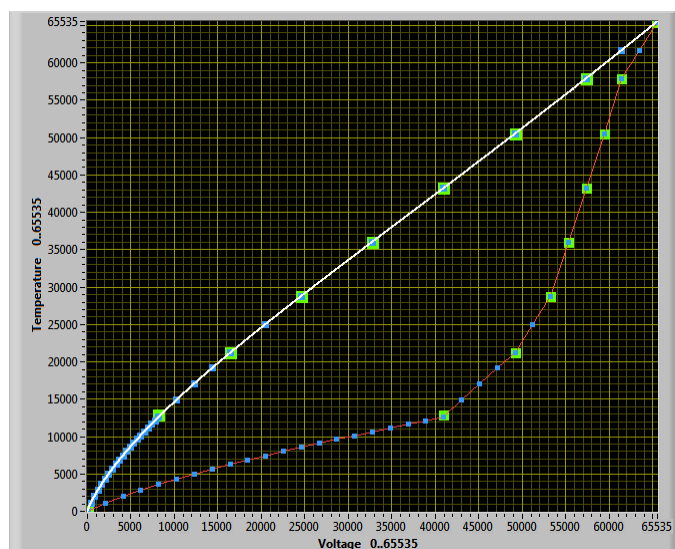
Glavni cilj korišćenja metode dvokoračne segmentne linearne aproksimacije, koja je prvi put predstavljena u ranije objavljenim radovima [12, 13, 21,], jeste izvođenje svih izračunavanja pomoću celobrojne aritmetike, kao i da se izbegne određivanje kom segmentu pripada ulazna vrednost, koja je obavezna kod metoda koje koriste podelu na nejednake segmente.

Nelinearna prenosna karakteristika se može aproksimirati pomoću više linearnih segmenata, pri čemu se zahteva da su linearni segmenti povezani, kako bi se obezbedilo da dobijena linearizovana karakteristika bude kontinualna.

Kod segmentne linearizacije, apscisa se deli na jednake segmente. Kako bi se smanjila greška aproksimacije, potrebno je povećati broj segmenata u delu u kome je prenosna karakteristika jako nelinearna. To dovodi do nejednakih veličina segmenata. Razlika u veličini segmenata dovodi do usporavanja metode linearizacije.

Jedan od načina da se zadrži mali broj potrebnih segmenata, a da se pri tom ne uspori proces linearizacije korišćenjem segmenata nejednake veličine, je korišćenje dvokoračne metode linearizacije, predložene u radu [12]. Kod ove metode, prvo se određuju delovi prenosne karakteristike u kojima je izražena nelinearnost. Zatim se vrši transformacija X – ose, tako što se segmenti u kojima je nelinearnost izražena razvuku u odnosu na ostatak karakteristike. Za transformaciju X – ose se takođe primenjuje segmentna linearizacija. Zatim se, na tako transformisanu karakteristiku, ponovo primenjuje segmentna linearizacija. Na taj način se smanjuje greška aproksimacije. Transformacija X – ose je ovde izvedena na drugačiji način u odnosu na postupak iz rada [12], korišćenjem iterativnog postupka.

Predloženi metod se može primeniti na različite tipove senzora. Glavni zahtev prilikom vršenja linearizacije jeste da greška aproksimacije bude manja od granične vrednosti greške, definisane NIST i BIPM standardima za termoparove [1, 2]. Konačna greška linearizacije u ovom radu će biti računata kao maksimalna razlika između vrednosti ordinate aproksimirane funkcije i vrednosti ordinate koja se dobija primenom inverzne polinomne funkcije koju definiše NIST, na celom opsegu vrednosti napona, za određeni tip termopara. Cela procedura, sa odgovarajućim grafičkim prikazima, se vrši korišćenjem razvijenih softverskih algoritama u programskom okruženju LabVIEW. Na Sl. 2. dat je Front panel virtuelnog instrumenta LabVIEW na kome je predstavljena normalizovana, inverzna, prenosna karakteristika termopara tipa E.



Sl. 2. Front panel LabVIEW – a, prikaz normalizovane, inverzne prenosne karakteristike termopara E tipa (bela linija) i karakteristika sa transformisanom X – osom (crvena linija)

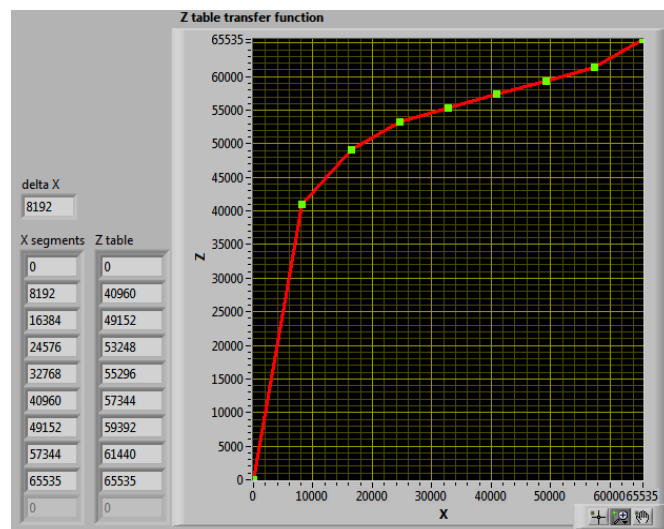
Zelene tačke na graficima odgovaraju početnoj podeli bele (početne) prenosne karakteristike na osam segmenata. Crvena prenosna karakteristika, nakon zamene X – ose sa Z, postaje $Y = f(Z)$. Ova prenosna karakteristika je podeljena na 32 jednaka segmenta, deljenjem apscise, Z – ose (plave tačke).

Vraćanjem plavih tačaka sa crvene na belu karakteristiku, može se uočiti da je praktično postignuta segmentna linearizacija sa podelom X – ose na nejednake segmente.

Konačno, linearizacija inverzne prenosne karakteristike termopara i izračunavanje temperature na osnovu normalizovane vrednosti ulaznog napona, vrši se prema relaciji:

$$Y = f_2(Z) = f_2(f_1(X)) = f_T(X) \quad (1)$$

Na Sl. 3. je prikazana funkcija $Z = f_1(X)$ koja transformiše X – osu na osam jednakih segmenata u opsegu od 0 do 65535.

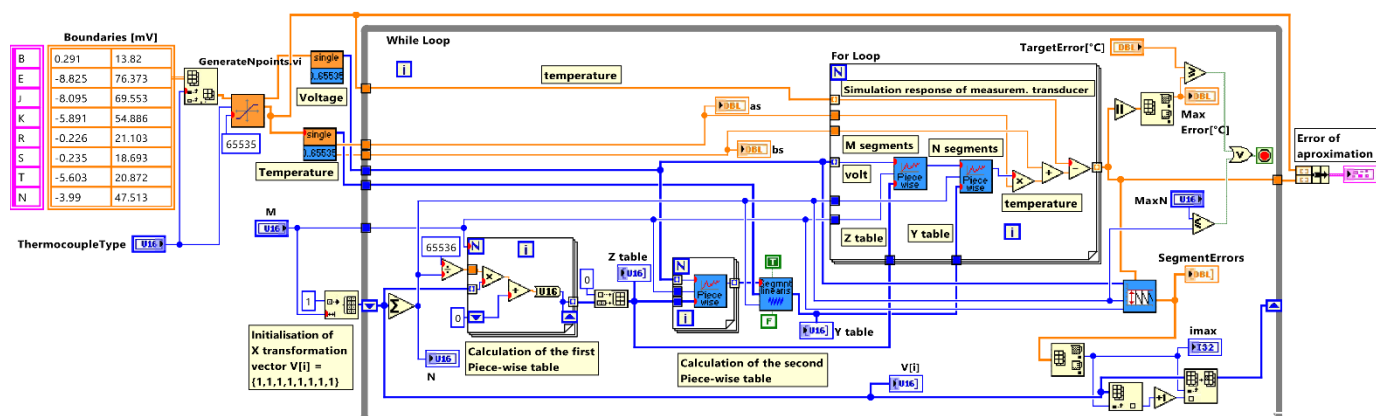


Sl. 3. Transformacija X – ose na 8 jednakih segmenata

Na Sl. 4. je dat prikaz LabVIEW blok dijagrama pomoću koga se vrše izračunavanja potrebna za primenu dvokoračne segmentne metode linearizacije karakteristike termopara, uključujući i računanje greške aproksimacije. U petljama se vrši iterativni postupak kako bi se dobile vrednosti potrebne za formiranje linearizacionih tabela. Ulazni parametri ove petlje su: broj segmenata u prvoj linearizacionoj tabeli, M, maksimalna dozvoljena greška aproksimacije (TargetError[°C] u LabVIEW blok dijagramu) i maksimalni dozvoljeni broj segmenata u drugoj linearizacionoj tabeli (MaxN). Petlja će se zaustaviti u iteraciji u kojoj je ispunjen jedan od dva uslova.

Na levoj strani blok dijagrama se bira jedan tip termopara, i u zavisnosti od izabranog tipa termopara, selektuje se odgovarajući opseg ulaznog napona. Zatim se, korišćenjem funkcije koju definiše NIST za polinomnu aproksimaciju, formira 65535 para tačaka napona i temperatura koje se nalaze u odgovarajućem opsegu, a nakon toga se vrednosti napona i temperature normalizuju na opseg od 0 do 65535.

Nelinearna prenosna karakteristika se deli na M jednakih segmenata, deljenjem X – ose, i određuju se segmenti u kojima je karakteristika izrazito nelinearna. Svaka tačka na X – osi se može izračunati kao $X_i = \Delta X \times i$, za $i=0, \dots, M$, pri čemu je veličina segmenata određena kao



Sl. 4. LabVIEW blok dijagram koji prikazuje iterativni postupak za određivanje linearizacionih tabela za dvokoračni metod linearizacije i konačne greške aproksimacije

$$\Delta X = \frac{65535}{M} \quad (2)$$

Zatim se vrši transformacija X – ose, tako što se segmentni u kojima je karakteristika izrazito nelinearna, razvuku, tj. formira se Z – osa, $Z_i = f_1(X_i)$.

$$Z_0 = 0, Z_i = Z_{i-1} + V[i]\Delta Z \quad (3)$$

Veličina segmenata na Z – osi, ΔZ , se izračuna pomoću jednačine:

$$\Delta Z = \frac{65535}{N} \quad (4)$$

U prvoj linearizacionoj tabeli je definisan vektor transformacije X – ose, $V[i]$, tj. niz koeficijenata u (3). Ukoliko se izabere $M=8$ segmenata za formiranje prve linearizacione tabele, početna vrednost ovog vektora će biti $V[i] = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$. Ovo znači da će druga linearizaciona tabela imati po jedan segment u svakom od osam naponskih opsega. Tokom iterativnog procesa, vektor $V[i]$ se menja tako što se element vektora, kome odgovara segment sa izrazitom nelinearnošću, povećava.

Vektor transformacije X – ose, koji odgovara termoparu sa Sl. 3., nakon finalne iteracije će biti $V[i] = \{20, 4, 2, 1, 1, 1, 1, 2\}$. Suma svih elemenata vektora $V[i]$ je 32, ukoliko je izabrana vrednost za $N=32$, tj. ukoliko je izabrano da se za drugu segmentnu linearizaciju apscisa podeli na 32 segmenta.

U ovom primeru, koristeći $V[i]$ prema (3), parametri u Z tabeli se računaju na sledeći način:

$$\begin{aligned} Z_0 &= 0, \\ Z_1 &= Z_0 + 20\Delta Z, \\ Z_2 &= Z_1 + 4\Delta Z = 20\Delta Z + 4\Delta Z = 24\Delta Z, \\ Z_3 &= Z_2 + 2\Delta Z = 24\Delta Z + 2\Delta Z = 26\Delta Z, \\ Z_4 &= Z_3 + \Delta Z = 26\Delta Z + \Delta Z = 27\Delta Z, \\ Z_5 &= Z_4 + \Delta Z = 27\Delta Z + \Delta Z = 28\Delta Z, \\ Z_6 &= Z_5 + \Delta Z = 28\Delta Z + \Delta Z = 29\Delta Z, \\ Z_7 &= Z_6 + \Delta Z = 29\Delta Z + \Delta Z = 30\Delta Z, \end{aligned} \quad (5)$$

$$Z_8 = Z_7 + 2\Delta Z = 30\Delta Z + 2\Delta Z = 32\Delta Z.$$

Transformisane X vrednosti, odnosno Z vrednosti, su izračunate na celom radnom opsegu, pomoću Z tabele (prve linearizacione tabele). Zatim se analizira inverzna kriva, tj. funkcija koja predstavlja transformisanu X – osu, kako bi se odredila 32 segmenta u drugom koraku linearizacije. Segmentna linearizacija koja se izvodi u drugom koraku je realizovana unutar Sub VI bloka, na isti način kao i određivanje vrednosti na osnovu prve linearizacione tabele, koja je u blok dijagramu nazvana “Segment Linearis” i “Pice_Wise”.

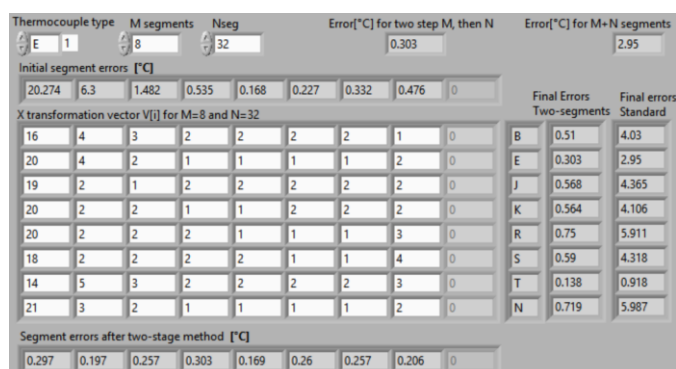
U desnom delu blok dijagrama nalazi se “For Loop” koja daje simulaciju odziva pretvarača, na osnovu linearizacionih tabela Z i Y. Na ulazu Sub VI se dovodi ulazni napon, čija je vrednost normalizovana na opsegu od 0 do 65535, i segmentna linearizacija se izvodi dva puta kako bi se aproksimirala inverzna prenosna karakteristika. Na kraju, dobijena vrednost se skalira na početni opseg temperature. Kako bi se izvršilo poređenje dobijene vrednosti sa vrednošću koju daje polinom koji propisuje NIST, računa se greška aproksimacije. Traženjem maksimalne greške aproksimacije na svakom od osam segmenata, u blok dijagramu se formira vektor “SegmentErrors”.

U donjem delu blok dijagrama, nalazi se funkcija čiji je zadatak da odredi u kom od osam segmenata je greška najveća. Kada se odredi segment sa najvećom greškom, “imax”, iterativni postupak povećava za jedan element vektora $V[imax]$. Petlja, u narednoj iteraciji, koristi izmenjenu vrednost vektora $V[i]$.

U primeru termopara tipa E, početne greške segmenta u stepenima Celzijusovim, za svaki od osam segmenata su 20.274, 6.3, 1.482, 0.535, 0.168, 0.227, 0.332 i 0.476, kao što se može videti na Sl. 5. Može se primetiti da je najveća greška aproksimacije u prvom segmentu, i iznosi 20.274 °C. Dakle, vektor $V[i]$ će u prvoj iteraciji da postane $\{2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$. Nastavljajući iterativni postupak, dobija se krajnja vrednost za vektor $V[i] = \{20, 4, 2, 1, 1, 1, 1, 2\}$.

Primenom dvokoračnog segmentnog metoda linearizacije, dobija se maksimalna greška na celom radnom opsegu od 0.303 °C. Upoređivanjem greške koja se dobija primenom metode dvokoračne segmentne linearizacije, korišćenjem prvo

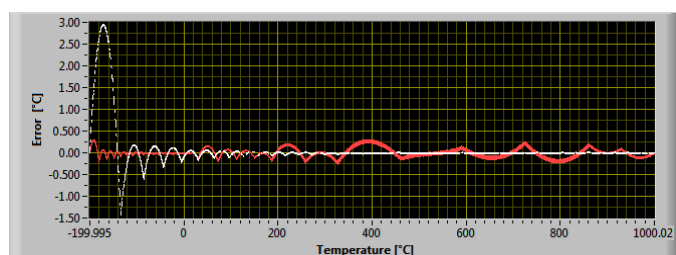
8, a zatim 32 segmenta, i metode segmentne linearizacije koja koristi 40 segmenata, zaključuje se da je greška smanjena 6 do 10 puta. Konačna greška aproksimacije za termopar tipa E je smanjena sa 2.95 °C na 0.303 °C, primenom metode dvokoračne segmentne linearizacije.



Sl. 5. Front panel sa koeficijentima prve linearizacije tabele i konačnim greškama, dobijenim primenom dvokoračne segmentne linearizacije metode koja koristi prvo 8, a zatim 32 segmenta i standardne segmentne aproksimacije sa 40 segmenata, za osam tipova termoparova,

Kako bi se izvršilo bolje poređenje metoda segmentne linearizacije i dvokoračne segmentne linearizacije, u tabeli 1 su date dobijene vrednosti greške aproksimacije za termopar tipa E, koje daju ove metode, za odabrane različite vrednosti broja segmenata M i N. Može se uočiti da povećanje broja segmenata, blago povećava prednost metode dvokoračne segmentne linearizacije, u odnosu na standardnu metodu sa M+N brojem segmenata.

Na Sl. 6. dat je Front panel na kome je prikazana greška aproksimacije dobijena primenom ove dve metode za termopar tipa E. Kriva označena belom bojom predstavlja grešku aproksimacije dobijenu korišćenjem standardne segmentne metode aproksimacije korišćenjem 40 segmenata. Kriva označena crvenom bojom predstavlja grešku aproksimacije koja je dobijena primenom dvokoračne segmentne metode linearizacije, korišćenjem prvo 8, a potom 32 segmenta. Može se primetiti da se primenom dvokoračne



Sl. 6. Greška aproksimacije dobijena primenom standardne metode linearizacije korišćenjem 40 segmenata (bela) i dvokoračne metode linearizacije korišćenjem prvo 8, zatim 32 segmenta (crvena), prikazana na Front panelu u LabVIEW

metode linearizacije značajno smanjuje greška aproksimacije.

Treba još napomenuti da je važno obratiti pažnju prilikom odabira vrednosti za M. Ukoliko je M malo, javlja se velika greška, a ako je suviše veliko, ne ostaje dovoljan broj segmenata za drugi korak linearizacije. Vrednost M je najbolje uzeti kao $M = (N + M)/4$, jer će u tom slučaju vrednost M biti u obliku 2^k . U svakom slučaju, dobijena greška je manja nego u slučaju primene standardne linearizacije metode.

Još jedna prednost ove metode jeste u tome što, ukoliko se ne koristi ceo temperaturni opseg termopara, već uži radni deo opsega, princip dvokoračne segmentne linearizacije je isti. Zadati opseg se na početku normalizuje na opseg od 0 do 65535, i primenjuje se linearizacija na prethodno opisan način. Smanjenje opsega će olakšati linearizaciju, jer se do željene tačnosti dolazi sa manjim brojem segmenata.

Uzimajući u obzir i druge izvore grešaka u mernom sistemu, vrednost greške od 0.2 °C se može opravdano uzeti za cilj za dati dvokoračni segmentni linearizacioni metod. U tabeli 2 je prikazan potreban broj segmenata za sve tipove termoparova kako bi se postigla greška aproksimacije od 0.2 °C, primenom standardne metode segmentne linearizacije i metode dvokoračne segmentne linearizacije.

TABELA 1

GREŠKE APROKSIMACIJE TERMOPARA TIPa E DOBIJENE PRIMENOM METODE SEGMENTNE LINEARIZACIJE I DVOKORAČNE SEGMENTNE LINEARIZACIJE

Vrednosti parametara M i N (broj segmenata)	Greška aproksimacije	
	Standardna linearizaciona metoda, M+N segmenata	Dvokoračna segmentna linearizaciona metoda, M, zatim N, segmenata
M=8, N=32	$\Delta T=2.95\text{ °C}$	$\Delta T=0.303\text{ °C}$
M=8, N=48	$\Delta T=1.79\text{ °C}$	$\Delta T=0.144\text{ °C}$
M=8, N=64	$\Delta T=1.20\text{ °C}$	$\Delta T=0.096\text{ °C}$
M=16, N=32	$\Delta T=2.26\text{ °C}$	$\Delta T=0.220\text{ °C}$
M=16, N=48	$\Delta T=1.44\text{ °C}$	$\Delta T=0.101\text{ °C}$
M=16, N=64	$\Delta T=1.00\text{ °C}$	$\Delta T=0.075\text{ °C}$

TABELA 2

POTREBAN BROJ SEGMENTATA KAKO BI SE DOBILA GREŠKA OD 0.2 °C, ZA SVE TIPOVE TERMOPAROVA

Tip termopara	Standardni linearizacioni metod	Dvokoračni linearizacioni metod	
	N=	M=8, N=	M=16, N=
B	215	52	46
E	196	43	35
J	270	53	42
K	250	52	42
R	330	70	51
S	260	59	46
T	92	27	26
N	342	64	47

IV. ZAKLJUČAK

Linearizacioni metod predstavljen u ovom radu, implementiran je na osnovu dvokoračne segmentne linearizacione metode predložene u radu [12]. Opisani metod je pogodan za primenu kod termoparova, s obzirom na nelinearnost njihove prenosne karakteristike.

Predloženi dvokoračni segmentni linearizacioni metod, u poređenju sa standardnom segmentnom linearizacionom metodom, za dat primer nelinearne prenosne karakteristike termopara, daje manju grešku aproksimacije 6 do 13 puta, sa sličnim vremenom izvršenja i jednakom potrošnjom memorije za čuvanje linearizacionih tabela.

Prikazana linearizaciona metoda se lako može primeniti korišćenjem celobrojne aritmetike, što smanjuje broj procesorskih ciklusa potrebnih za izvođenje proračuna, kao i memorijskog prostora potrebnog za pamćenje linearizacionih tabela, za razliku od polinomne aproksimacije. Primena dvokoračnog segmentnog linearizacionog metoda je prikazana na primeru termopara, ali se može primeniti za linearizaciju nelinearne prenosne karakteristike i drugih senzora.

LITERATURA

- [1] Burns G, Scroger M, Strouse G, et al. NIST Monograph 175: Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90, April 1993.
- [2] Bedford R, Bonnier G, Maas H, Pavese F. Techniques for approximating the ITS-90, monograph BIPM, Bureau International des Poids et Mesures. Se`vres, France, 1990.
- [3] Measuresoft. DATASCAN 7000 distributed data acquisition system thermocouple accuracy, datascan.measure-soft.com/docs/TC.pdf (accessed November 2019).
- [4] Chen A and Chen C. Evaluation of piecewise polynomial equations for two types of thermocouples. *Sensors* 2013; 13(12): 17084–17097.
- [5] Wang X, Wei G and Sun J. Free knot recursive B-spline for compensation of nonlinear smart sensors. *Measurement* 2011; 44(5): 888–894.
- [6] Nadi M, Margo C, Kouider M, et al. Embedded system design and implementation of standard auto-calibrated measurement chain. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* 2008; 1(1): 21–33.
- [7] Danisman K, Dalkirana I and Celebib FV. Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. *Measurement* 2006; 39(8): 695–700.
- [8] Rivera J, Carrillo M, Chaco'n M, et al. Self-calibration and optimal response in intelligent sensors design based on artificial neural networks. *Sensors* 2007; 7(8): 1509–1529.
- [9] Dey D and Munshi S. A new intelligent scheme for simultaneous cold junction compensation and linearization of thermocouples. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011; 19: 13–28.
- [10] Bengtsson LE. Lookup table optimization for sensor linearization in small embedded systems. *Journal of Sensor Technology* 2012; 2(4): 177–184.
- [11] Erdem H. Implementation of software-based sensor linearization algorithms on low-cost microcontrollers. *ISA Transactions* 2010; 49(4): 552–558.
- [12] Živanović D, Arsić M and Đorđević J. Two-stage piece-wise linearization method. *International Journal of Modelling and Simulation* 2004; 24(2): 85–89.
- [13] Živanović D, Simić M. Two-stage segment linearization as part of the thermocouple measurement chain. *Measurement and Control* 2021; 54(1-2) 141–151
- [14] Sarma U and Boruah PK. Design and development of a high precision thermocouple based smart industrial thermometer with on line linearisation and data logging feature. *Measurement* 2010; 43(10): 1589-1594.
- [15] Islam T and Mukhopadhyay SC. Linearization of the sensors characteristics: a review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2019, 12(1):1-21
- [16] Živanović D, Lukić J and Denić D. A novel linearization method of sin/cos sensor signals used for angular position determination. *Journal of Electrical Engineering & Technology - JEET* 2014; 9(4): 1437-1445.
- [17] Jovanović J and Denić D. A cost-effective method for resolution increase of the two-stage piecewise linear ADC used for sensor linearization. *Measurement Science Review* 2016; 16(1): 28-34.
- [18] JUMO GmbH & Co. KG. Data sheet 90.1000, Construction and application of thermocouples, www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=4121 (2009, pristupljeno mart 2022).
- [19] Texas Instruments. TI designs, Optimized sensor linearization for thermocouple, www.ti.com/lit/ug/tidua11a/tidua11a.pdf (2015, pristupljeno, mart 2022).
- [20] Duff M and Towey J. Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity, accuracy and flexibility. *Analog Dialogue* 2010; 44(10): 1–6.
- [21] Živanović D, Arsić M, Đorđević J, et al. Two stages piece-wise linearization method for intelligent transducers. In: *International scientific conference—ICEST 2003*, Sofia, Bulgaria, December 2003, pp.383–386.

ABSTRACT

The paper presents the implementation of a two - stage piece - wise linearization method to reduce the thermocouple approximation error. The first part describes the software processing of the measuring signal of the transducer with a thermocouple. Evaluation of linearization functions and analysis of approximation errors is performed by the LabVIEW virtual instrumentation software package. The basic principle of this method is to first transform the abscissa of the transfer function using a linear segment look - up table in such a way that the range of input values expands to the ranges where the nonlinearity of the characteristic is significant, and then standard piece - wise linearization is performed. In this way, the application of the two-stage linearization method on equal segments has the same effect as the application of linearization on unequal segments. For the given examples of transfer functions of thermocouples, the proposed method gives a significantly smaller approximation error, with equal memory consumption for look - up tables. The simple software implementation of this two-stage linearization method allows it to be used in low calculation power microcontroller measurement transducers, instead of standard piece - wise linearization.

**Two-stage segment linearization
as part of the thermocouple
measurement chain**

Dragan Živanović, Milan Simić, Milica Stojanović and
Dragan Denić