

Kolo za kompenzaciju nelinearnosti enkodera ugaone pozicije

1. Jelena Jovanović

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

u Nišu

Niš, Srbija

jelena.jovanovic@elfak.ni.ac.rs i 0000-

0001-7238-6393

2. Dragan Denić

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

u Nišu

Niš, Srbija

dragan.denic@elfak.ni.ac.rs i 0000-

0001-5582-0944

3. Ivana Randelović

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

u Nišu

Niš, Srbija

ivana.randjelovic@elfak.ni.ac.rs i

0009-0005-9126-7396

4. Goran Miljković

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

u Nišu

Niš, Srbija

goran.miljkovic@elfak.ni.ac.rs i 0009-

0004-1973-2911

5. Milan Dinčić

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

u Nišu

Niš, Srbija

milan.dincic@elfak.ni.ac.rs i 0000-

0001-7508-0277

Abstract—U ovom radu je opisano kolo za kompenzaciju nelinearnosti enkodera ugaone pozicije koje se sastoji od kola za predobradu signala i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora. Dovodenjem naponskih signala sa izlaza enkodera na ulaze kola za predobradu, generiše se modifikovani sinusni signal spreman za dalju obradu, tj. linearizaciju i digitalizaciju u dvostepenom deo-po-deo linearnom A/D konvertoru. Prvi stepen A/D konverzije izvodi deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor niske rezolucije, dok se u drugom stepenu A/D konverzije koristi linearni fleš A/D konvertor visoke rezolucije. Simulacije mernog sistema sprovedene u LabVIEW softveru pokazale su značajno smanjenje maksimalne apsolutne greške nelinearnosti i relativne greške nelinearnosti mernog sistema sa vrednosti od 0,33067 rad i 21,05 % pre linearizacije, na vrednosti od 0,02456 rad i 0,3909 % nakon linearizacije predloženim kolom, respektivno.

Ključne reči—linearizacija, kolo za predobradu signala, deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor, rezolucija, greška nelinearnosti

I. UVOD

Enkoder ugaone pozicije je senzor koji se široko primenjuje u robotici, kontrolnim sistemima, medicinskoj opremi, radarskim i drugim sistemima u cilju određivanja ugaone pozicije, pomeraja i brzine rotirajućih objekata. Nedostatak ovog senzora predstavlja izražena nelinearnost njegove prenosne funkcije koja je sinusnog oblika. U pojedinim delovima mernog opsega gde je nelinearnost najviše izražena, čak i velika promena merene veličine neće dovesti do primetne promene izlaznog naponskog signala, čime je tačnost merenja značajno narušena.

U ovom radu je predloženo kolo za kompenzaciju nelinearnosti i poboljšanje tačnosti enkodera ugaone pozicije, koje se može primeniti i za linearizaciju drugih sinusoidalnih senzora, poput magnetnih enkodera ili rezolvera kojima je za rad potreban i pobudni sinusni signal [1]. Za razliku od postojećih digitalnih [2] i analognih tehnika linearizacije [3], predložena tehnika ne zahteva značajnu procesorsku snagu i poseduje veliku fleksibilnost koja nedostaje analognim tehnikama linearizacije.

Obrada izlaznih naponskih signala enkodera ($\sin(x)$ i $\cos(x)$), gde x predstavlja trenutnu vrednost ugaone pozicije) započinje u specijalnom kolu za predobradu signala. Na izlazu tog kola

dobija se modifikovani sinusni signal čije su vrednosti veće od ili jednake 0 V u celom mernom opsegu od 0 rad do 2π rad (ispravljen sinusni signal). Dodatno, na izlazu kola za predobradu dobija se 2-bitna kodna reč koja ukazuje na to kom kvadrantu, širine $\pi/2$ rad, pripada trenutna vrednost ugaone pozicije koja se meri. Obrada modifikovanog sinusnog signala nastavlja se u dvostepenom deo-po-deo linearnom A/D konvertoru [4]–[6]. Kompenzacija nelinearnosti enkodera odvija se u prvom stepenu A/D konverzije jer je prenosna funkcija ovog stepena deo-po-deo linearna aproksimacija funkcije koja je inverzna prenosnoj funkciji enkodera. U prvom stepenu A/D konverzije određuje se neuniformni segment ulaznog opsega (segmenti su različite širine) kome pripada tekući odmerak modifikovanog sinusnog signala. U drugom stepenu A/D konverzije određuje se uniformna ćelija unutar određenog neuniformnog segmenta (ćelije su iste širine), kojoj pripada tekući odmerak modifikovanog sinusnog signala [4]. Za razliku od predložene tehnike linearizacije enkodera ugaone pozicije, u radovima [7]–[10] su opisane tehnike za postizanje linearnog odziva rezolvera ugaone pozicije koje se zasnivaju na obradi signala specijalnim analognim kolima. Za razliku od pomenutih tehnika, predloženo kolo za linearizaciju omogućava i istovremenu digitalizaciju rezultata merenja, skraćujući ukupno vreme obrade signala i smanjujući troškove realizacije digitalnog mernog sistema za određivanje ugaone pozicije.

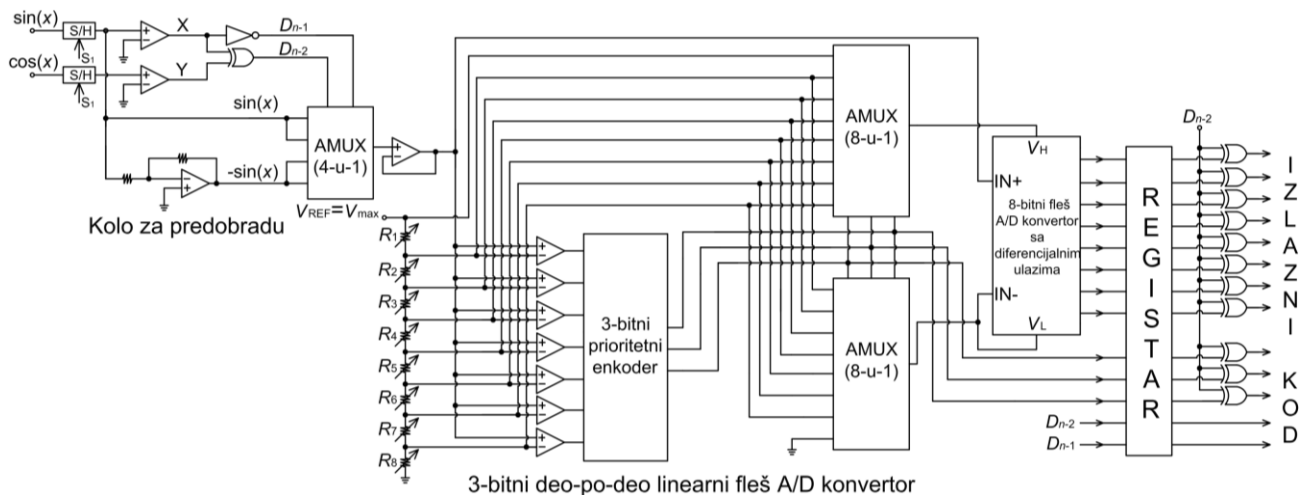
II. PREDLOŽENO KOLO ZA LINEARIZACIJU ENKODERA UGAONE POZICIJE

Kao što je već pomenuto, predloženo kolo za linearizaciju enkodera ugaone pozicije sastoji se iz dva dela: kola za predobradu signala i dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora, Sl. 1. Dizajn i princip rada svakog od ovih delova predloženog kola detaljno su izloženi u nastavku.

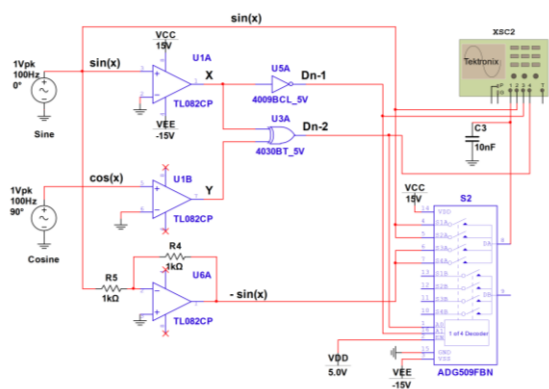
A. Kolo za predobradu signala

Kao što je prikazano na Sl. 1, izlazni signali enkodera se dovode na ulaze kola za predobradu koje se sastoji od dva komparatora, jednog invertujućeg pojačavača jediničnog pojačanja, logičkog invertora, logičkog XOR kola i analognog multipleksera 4-u-1. Na Sl. 2 je prikazana električna šema kola za predobradu signala izrađena u softveru NI Multisim.

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [evidencioni broj ugovora: 451-03-65/2024-03/200102].



Sl. 1 Dizajn predloženog kola za linearizaciju enkodera ugaone pozicije sačinjen od kola za predobradu signala, 3-bitnog deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora i 8-bitnog linearnog fleš A/D konvertora sa diferencijalnim ulazima.



Sl. 2 Simulacija kola za predobradu signala u NI Multisim softveru.

Signali koji su dobijeni simulacijom kola za predobradu u NI Multisim softveru prikazani su na prednjem panelu osciloscopa Tektronix, Sl. 3. U okviru kola za predobradu signala generisani su digitalni signali X i Y i analogni signal $-\sin(x)$, dok izlaz kola za predobradu predstavlja modifikovani sinusni signal (videti kanal CH1, Sl. 3). Reč je o signalu koji u prva dva kvadranta širine $\pi/2$ rad ima oblik funkcije $\sin(x)$, dok u preostala dva kvadranta ima oblik funkcije $-\sin(x)$. Dodatno, na izlazu kola za predobradu signala generisani su biti:

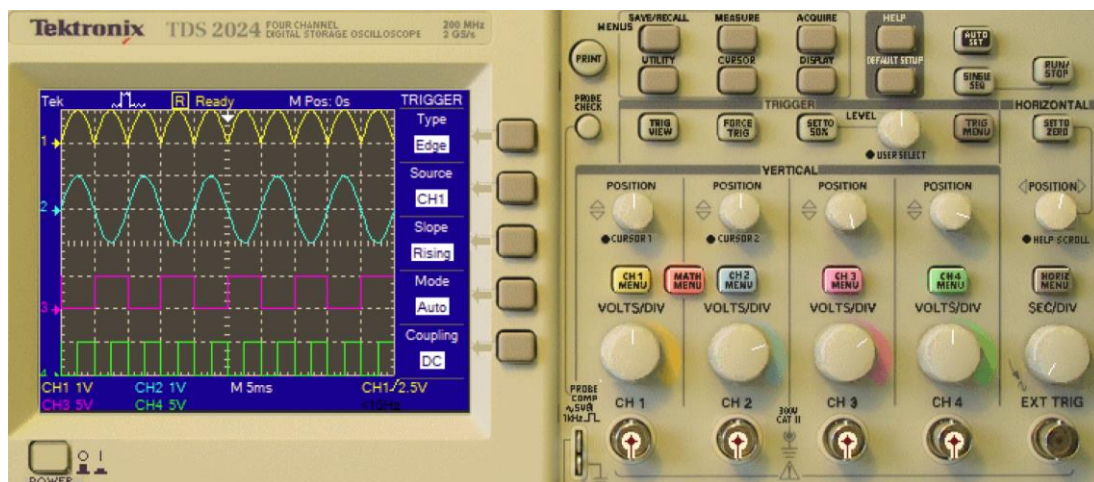
$$D_{n-1} = \bar{X}, \tag{1}$$

$$D_{n-2} = X \oplus Y, \tag{2}$$

koji ukazuju na to u kom kvadrantu širine $\pi/2$ rad se nalazi trenutna vrednost ugaone pozicije koja se meri (Tabela I). Bit D_{n-1} je bit najveće težine u finalnom izlaznom kodu, dok n predstavlja ukupnu rezoluciju predloženog kola za linearizaciju ($n=2+N_1+N_2$, gde je N_1 rezolucija prvog, a N_2 rezolucija drugog stepena A/D konverzije). Biti D_{n-1} i D_{n-2} istovremeno upravljaju radom analognog multipleksera 4-u-1, na čijem se izlazu dobija modifikovani sinusni signal. Vrednosti ovih bita u svakom kvadrantu širine $\pi/2$ rad mogu se videti na Sl. 3 (bit D_{n-1} na kanalu CH3, a bit D_{n-2} na kanalu CH4 osciloscopa), kao i u Tabeli I.

TABELA I. SIGNALI I BITI GENERISANI U OKVIRU I NA IZLAZU KOLA ZA PREDOBADU

Ugaona pozicija x rad	X ($\sin(x)>0$)	Y ($\cos(x)>0$)	D_{n-1}	D_{n-2}	Izlazni signal
$0-\pi/2$	1	1	0	0	$\sin(x)$
$\pi/2-\pi$	1	0	0	1	$\sin(x)$
$\pi-3\pi/2$	0	0	1	0	$-\sin(x)$
$3\pi/2-2\pi$	0	1	1	1	$-\sin(x)$



Sl. 3 Prikaz signala dobijenih simulacijom kola za predobradu u NI Multisim softveru.

B. Dvostepeni deo-po-deo linearni A/D konvertor

Na Sl. 1 prikazan je dvostepeni deo-po-deo linearni A/D konvertor koji se sastoji od deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora rezolucije $N_1=3$ bita i 8-bitnog linearnog fleš A/D konvertora sa diferencijalnim ulazima ($N_2=8$ bita). Proces linearizacije prenosne funkcije enkodera obavlja deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor budući da je njegova prenosna funkcija deo-po-deo linearna aproksimacija funkcije koja je inverzna prenosnoj funkciji enkodera, tj. funkciji $\sin(x)$. Prenosna funkcija enkodera linearizuje se u opsegu od 0 rad do $\pi/2$ rad gde funkcija $\sin(x)$ ima jednoznačne vrednosti, odnosno u prvom od četiri kvadranta koji čine celokupan merni opseg. Redni broj kvadranta kome pripada trenutna vrednost merene ugaone pozicije određen je bitima D_{n-1} i D_{n-2} , koji se generišu na izlazu kola za predobradu signala. Dakle, iako se linearizacija odvija samo u prvom kvadrantu celokupnog mernog opsega, ugaona pozicija se može meriti u opsegu od 0 rad do 2π rad.

Važno svojstvo deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora predstavlja njegova sposobnost prilagođavanja za linearizaciju različitih tipova senzora, a ne samo sinusoidalnih, pri čemu što je nelinearnost prenosne funkcija senzora izraženija to je tačnost merenja niža, a potreba za linearizacijom veća. Drugim rečima, prenosna funkcija ovog A/D konvertora može biti prilagođena tako da predstavlja deo-po-deo linearnu aproksimaciju funkcije koja je inverzna prenosnoj funkciji bilo kog senzora, jednostavnim podešavanjem vrednosti graničnih napona (referentni naponi komparatora). Granični naponi predstavljuju granice neuniformnih segmenata unutar ulaznog opsega deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora. Prilikom implementacije deo-po-deo linearnih A/D konvertora preferira se fleš tip A/D konvertora zbog mogućnosti podešavanja referentnih napona komparatora, koji odgovaraju graničnim naponima. Velika brzina konverzije fleš A/D konvertora jeste još jedan razlog zbog koga se on često koristi za linearizaciju senzora. S druge strane, sa povećanjem rezolucije fleš A/D konvertora, njegova kompleksnost, potrošnja energije i troškovi realizacije značajno rastu. Iz tog razloga se radi na razvoju kompaktnih rešenja fleš A/D konvertora za primene u linearizaciji senzora [4].

Dakle, granični naponi se mogu precizno podešavati promenom vrednosti (trimovanjem) otpornika u lestvičastoj mreži otpornika fleš A/D konvertora. Referentni napon deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora jednak je amplitudi A sinusnog naponskog signala sa izlaza enkodera, tako da važi da je $V_{REF}=V_{max}=A$ (u konkretnom slučaju $A=1$ V). Vrednosti neuniformnih graničnih napona V_{Gi} se određuju na sledeći način:

$$V_{Gi}=A \cdot \sin\left(i \frac{\pi}{2^{N_1}}\right), i=1, \dots, 2^{N_1} - 1. \quad (3)$$

Proces konverzije, a sa njim i proces linearizacije, započinje dovođenjem odmerka modifikovanog sinusnog signala na ulaze sedam komparatora 3-bitnog deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora (videti Sl. 1). Odmerci signala se porede sa graničnim naponima, koji su podešeni trimovanjem otpornika R_1 - R_8 koji čine lestvičastu mrežu. Podešavanjem vrednosti ovih otpornika, a sa njima i vrednosti graničnih (referentnih) napona na ulazima komparatora, modifikuje se prenosna funkcija deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora. Osim komparatora i lestvičaste mreže otpornika, deo-po-deo linearni fleš A/D konvertor čini i 3-bitni prioritetni enkoder, na čije se ulaze dovode digitalni signali sa izlaza komparatora. Biti koji se dobijaju na izlazu prioritetskog enkodera koriste se za kontrolu rada dva analogna multipleksera

8-u-1. Zadatak ovih multipleksera je da od ulaznih napona selektuju ona dva napona koji predstavljaju gornju i donju granicu neuniformnog segmenta kome pripada tekući odmerak signala. Dakle, na izlazu prvog stepena A/D konverzije se osim 3-bitne kodne reči kojom je predstavljen tekući neuniformni segment (od ukupno 2^{N_1} segmenata), dobijaju i granice tog segmenta koje istovremeno predstavljaju granice ulaznog opsega drugog stepena A/D konverzije.

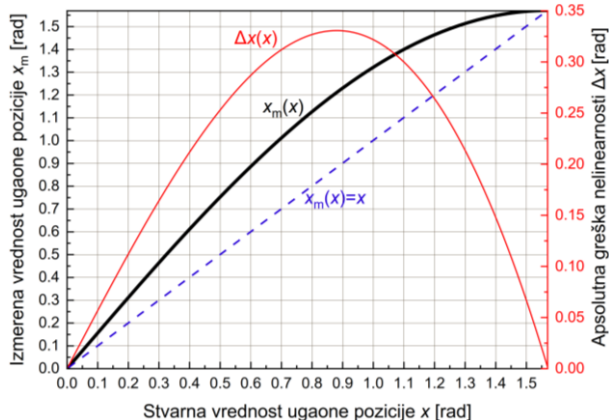
Drugi stepen A/D konverzije, iako ne vrši linearizaciju, ima zadatak da lokalizuje uniformnu ćeliju, unutar definisanog neuniformnog segmenta, kojoj pripada tekući odmerak ulaznog signala (ukupan broj ćelija je 2^{N_2}). Dakle, uloga drugog stepena A/D konverzije se ogleda u povećanju rezolucije i smanjenju greške kvantizacije koja je uneta u signal u prvom stepenu A/D konverzije, čime se doprinosi smanjenju greške merenja ugaone pozicije. Kako je drugi stepen A/D konverzije linearan, odnosno ima linearnu prenosnu funkciju, fleš A/D konvertor implementiran u ovom stepenu konverzije poseduje lestvičastu mrežu otpornika sačinjenu od fiksnih otpornika međusobno jednakih otpornosti. Na ovaj način je ulazni opseg linearnog fleš A/D konvertora podeljen na uniformne ćelije, odnosno ćelije jednake širine. U drugom stepenu A/D konverzije, pored fleš A/D konvertora, mogu se koristiti i drugi tipovi linearnih A/D konvertora, naročito ako brzina konverzije nije od suštinskog značaja, a istovremeno je potrebno smanjiti kompleksnost i potrošnju energije.

Ukupna rezolucija dvostepenog deo-po-deo linearnog A/D konvertora, prikazanog na Sl. 1, iznosi 11 bita. Uključujući i bite koje generiše kolo za predobradu signala, dužina izlaznog koda predloženog kola za linearizaciju enkodera ugaone pozicije iznosi $n=13$ bita. Kako bi prenosna funkcija celokupnog mernog sistema (zavisnost izmerene od stvarne vrednosti ugaone pozicije) bila monotono rastuća funkcija, potrebno je invertovati bite koji su manje težine od bita D_{n-2} , tj. bite D_{n-3} - D_0 . To se može postići dovođenjem bita D_{n-2} zajedno sa bitima D_{n-3} - D_0 na ulaze XOR logičkih kola, kao što je prikazano na Sl. 1. Dakle, primenom predloženog kola za linearizaciju enkodera ugaone pozicije postignuto je da se merni opseg sistema proširi sa $\pi/2$ rad na 2π rad, kao i to da prenosna funkcija mernog sistema bude monoto rastuća linearna funkcija u celom mernom opsegu.

III. REZULTATI SIMULACIJA I NJIHOVA ANALIZA

Primenom LabVIEW softvera simuliran je princip rada celokupnog mernog sistema, odnosno simulirana je promena ugaone pozicije x , izlazni naponski signali enkodera $\sin(x)$ i $\cos(x)$, kolo za predobradu signala i dvostepeni deo-po-deo linearni A/D konvertor. Kolo za predobradu signala realizovano je u vidu pod-virtuelnog instrumenta koji se poziva u okviru glavnog virtuelnog instrumenta. U simulaciji je omogućeno da se za različite vrednosti rezolucija prvog i drugog stepena A/D konverzije N_1 i N_2 , respektivno, generišu maksimalna vrednost apsolutne greške nelinearnosti Δx_{max} u rad i relativna greška nelinearnosti NE u %. Takođe, generisana je i prenosna funkcija celokupnog mernog sistema pre i nakon linearizacije. Rezultati simulacija su prikazani na Sl. 4 i Sl. 5, kao i u Tabeli II.

Na Sl. 4 je prikazana prenosna funkcija mernog sistema $x_m(x)$, odnosno zavisnost izmerene vrednosti ugaone pozicije x_m od stvarne vrednosti ugaone pozicije x (debeli linija crne boje), pre linearizacije. Na Sl. 4 je prikazana i idealna linearna prenosna funkcija mernog sistema oblika $x_m(x)=x$ (isprekidana linija plave



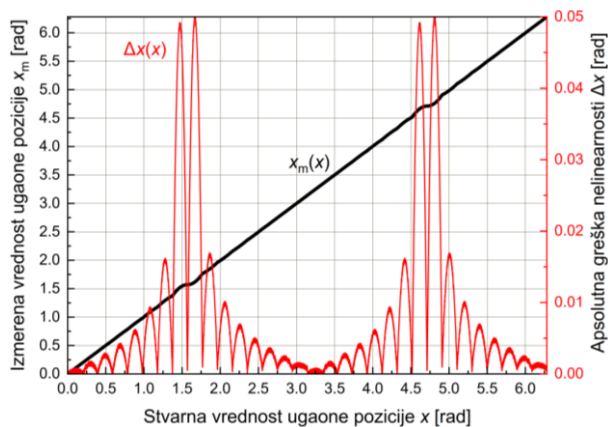
Sl. 4 Prenosna funkcija mernog sistema $x_m(x)$ i dijagram apsolutne greške nelinearnosti $\Delta x(x)$ pre linearizacije.

boje). Dijagram apsolutne greške nelinearnosti $\Delta x(x)$ mernog sistema pre linearizacije, tj. dijagram apsolutne vrednosti razlike stvarne i izmerene vrednosti ugaone pozicije, takođe je prikazan na Sl. 4 (tanka linija crvene boje). Sa slike se može uočiti u kom delu mernog opsega, širine $\pi/2$ rad, je nelinearnost prenosne funkcije mernog sistema najizraženija. Maksimalna vrednost apsolutne greške nelinearnosti i relativna greška nelinearnosti u ovom slučaju iznose: $\Delta x_{\max}=0,33067$ rad i $NE=21,05$ %, respektivno. Relativna greška nelinearnosti NE u % predstavlja odnos maksimalne apsolutne greške nelinearnosti na mernom opsegu Δx_{\max} u rad i širine mernog opsega FS u rad, kao što je dato u sledećem izrazu:

$$NE = \frac{\Delta x_{\max}}{FS} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

gde je $FS=\pi/2$ rad. Uvođenjem kola za predobradu signala merni opseg FS je proširen sa $\pi/2$ rad na 2π rad.

Na Sl. 5 su prikazane prenosna funkcija mernog sistema (debeli linija crne boje) i dijagram apsolutne greške nelinearnosti (tanka linija crvene boje) nakon uvođenja predloženog kola za linearizaciju rezolucije $n=13$ bita ($N_1=3$ bita, $N_2=8$ bita, Sl. 1). Dakle, i nakon linearizacije je prisutna određena, tzv. rezidualna nelinearnost koja se može iskazati sledećim parametrima: $\Delta x_{\max}=0,04997$ rad i $NE=0,79537$ %. Vrednosti Δx_{\max} i NE su date i u Tabeli II za različite kombinacije vrednosti rezolucija prvog i drugog stepena A/D konverzije N_1 i N_2 , respektivno. Na osnovu vrednosti prikazanih u Tabeli II,



Sl. 5 Prenosna funkcija mernog sistema $x_m(x)$ i dijagram apsolutne greške nelinearnosti $\Delta x(x)$ nakon linearizacije.

može se zaključiti da je rezidualna nelinearnost utoliko manja, što je rezolucija prvog stepena A/D konverzije veća, dok povećanje rezolucije drugog stepena A/D konverzije ne doprinosi značajnijem smanjenju nelinearnosti. Dakle, i numeričkim rezultatima je potvrđeno da se linearizacija odvija u prvom stepenu A/D konverzije. U najboljem slučaju, tj. kada su rezolucije $N_1=4$ bita i $N_2=12$ bita, maksimalna apsolutna greška nelinearnosti i relativna greška nelinearnosti iznose: $\Delta x_{\max}=0,02456$ rad i $NE=0,3909$ %, respektivno. Dakle, maksimalna apsolutna greška nelinearnosti je 13 puta manja, a relativna greška nelinearnosti 54 puta manja u odnosu na slučaj kada nema linearizacije. Slučajevi u kojima je rezolucija deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora veća od $N_1=4$ bita nisu analizirani, zbog velike kompleksnosti, odnosno velikog broja komparatora i otpornika koji bi u tom slučaju bili potrebni za realizaciju deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora.

TABELA II. MAKSYMALNA APSOLUTNA GREŠKA NELINEARNOSTI I RELATIVNA GREŠKA NELINEARNOSTI MERNOG SISTEMA NAKON LINEARIZACIJE U ZAVISNOSTI OD REZOLUCIJA PRVOG I DRUGOG STEPENA A/D KONVERZIJE

N_1 bita	N_2 bita	Δx_{\max} rad	NE %
2	8	0,09939	1,58191
3	8	0,04997	0,79537
4	8	0,02502	0,3982
2	10	0,09775	1,55581
3	10	0,04923	0,78349
4	10	0,02466	0,39243
2	12	0,09736	1,54954
3	12	0,04903	0,78028
4	12	0,02456	0,3909

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predloženo kolo za linearizaciju enkodera ugaone pozicije koje se sastoji od kola za predobradu signala koje na svom izlazu daje modifikovani sinusni signal, deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora i linearnog fleš A/D konvertora sa diferencijalnim ulazima. Predloženim kolom za linearizaciju, preciznije uz pomoć kola za predobradu signala, merni opseg sistema je proširen sa $\pi/2$ rad na 2π rad. U zavisnosti od rezolucije deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora, maksimalna apsolutna greška nelinearnosti mernog sistema se može smanjiti do vrednosti od 0,02456 rad, što je čak 13 puta manje nego u slučaju kada nema linearizacije. Sa povećanjem rezolucije deo-po-deo linearnog fleš A/D konvertora nelinearnost se smanjuje, dok kompleksnost A/D konvertora raste, zbog čega je rezolucija ovog A/D konvertora ograničena na 4 bita. Treba istaći još jednu veliku prednost predloženog kola za linearizaciju enkodera ugaone pozicije, a koja se ogleda u istovremenoj linearizaciji i digitalizaciji rezultata merenja ugaone pozicije. Na ovaj način je ukupno vreme obrade signala značajno skraćeno, a kompleksnost i troškovi realizacije digitalnog mernog sistema značajno redukovani.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] J. G. Webster and H. Eren, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. Boca Raton, USA: CRS Press, 2014., <https://doi.org/10.1201/b15474>.

- [2] L. Iafolla, M. Filipozzi, S. Freund, A. Zam, G. Rauter, and P. C. Cattin, "Machine learning-based method for linearization and error compensation of a novel absolute rotary encoder," *Measurement*, vol. 169, pp. 1–10, February 2021., <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108547>.
- [3] M. Benammar and A. S. P. Gonzales, "Position measurement using sinusoidal encoders and all-analog PLL converter with improved dynamic performance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, pp. 2414–2423, April 2016., <https://dx.doi.org/10.1109/TIE.2015.2506630>.
- [4] J. Jovanović, D. Denić, U. Jovanović, and D. Živanović, "Nonlinearity compensation and accuracy improvement method for an optical rotary encoder," *FU Aut. Con. Rob.*, vol. 20, pp. 167–178, 2021., <https://doi.org/10.22190/FUACR211101013J>.
- [5] G. Bucci, M. Faccio, and C. Landi, "New ADC with piecewise linear characteristic: case study-implementation of a smart humidity sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, pp. 1154–1166, December 2000., <https://doi.org/10.1109/19.893250>.
- [6] A. J. Lopez-Martin, M. Zuza, and A. Carlosena, "A CMOS A/D converter with piecewise linear characteristic and its application to sensor linearization," *Analog Integr. Circ. S.*, vol. 36, pp. 39–46, July 2003., <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024437311497>.
- [7] M. Benammar, L. Ben-Brahim, and M. A. Alhamadi, "A high precision resolver-to-DC converter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2289–2296, December 2005., <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.858135>.
- [8] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M. A. Alhamadi, N. Alemadi, and M. Alhitmi, "A new low cost linear resolver converter," *IEEE Sensors J.*, vol. 8, pp. 1620–1627, October 2008., <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.928924>.
- [9] L. Ben-Brahim, M. Benammar, and M. A. Alhamadi, "A resolver angle estimator based on its excitation signal," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, pp. 574–580, February 2009., <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2002719>.
- [10] M. Benammar, L. Ben-Brahim, M. A. Alhamadi, and M. Al-Naemi, "A novel method for estimating the angle from analog co-sinusoidal quadrature signals," *Sensor Actuat. A-Phys.*, vol. 142, pp. 225–231, March 2008., <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.025>.

ABSTRACT

This paper describes a circuit for nonlinearity compensation of an angular position encoder, consisting of a signal preprocessing circuit and a two-stage piecewise linear A/D converter. By feeding voltage signals from the encoder outputs into the preprocessing circuit inputs, a modified sinusoidal signal is obtained and prepared for further processing, i.e. linearization and digitalization in the two-stage piecewise linear A/D converter. The first stage of A/D conversion is performed by a piecewise linear flash A/D converter of low resolution, while a linear flash A/D converter of high resolution is employed in the second stage of A/D conversion. Simulations of the measurement system conducted in the LabVIEW software have shown a significant reduction in the maximal absolute nonlinearity error and relative nonlinearity error of the measurement system from values of 0,33067 rad and 21,05 % before linearization to values of 0,02456 rad and 0,3909 % after linearization by the proposed circuit, respectively.

A circuit for nonlinearity compensation of an angular position encoder

Jelena Jovanović, Dragan Denić, Ivana Ranđelović, Goran Miljković, Milan Dinčić