

Realizacija i očitavanje staklenog diska pseudoslučajnog apsolutnog enkodera

1. Goran Miljković

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
u Nišu

Niš, Republika Srbija

goran.miljkovic@elfak.ni.ac.rs

<https://orcid.org/0009-0004-1973-2911>

2. Ivana Randelović

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
u Nišu

Niš, Republika Srbija

ivana.randjelovic@elfak.ni.ac.rs

<https://orcid.org/0009-0005-9126-7396>

3. Dragan Denić

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
u Nišu

Niš, Republika Srbija

dragan.denic@elfak.ni.ac.rs

<https://orcid.org/0000-0001-5582-0944>

4. Aleksandar Jocić

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
u Nišu

Niš, Republika Srbija

aleksandar.jocic@elfak.ni.ac.rs

<https://orcid.org/0009-0009-7869-8473>

5. Jelena Jovanović

Katedra za merenja

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
u Nišu

Niš, Republika Srbija

jelena.jovanovic@elfak.ni.ac.rs

<https://orcid.org/0000-0001-7238-6393>

Abstract—U radu je najpre opisan postupak izrade staklenog diska optičkog pseudoslučajnog enkodera rezolucije 10 bita. Na disku su smeštene jedna sinhronizaciona traka i dve fazno pomerene 10-bitne pseudoslučajne kodne trake. Potom je predstavljen postupak očitavanja koda sa realizovanog diska enkodera. Očitani signali, nakon njihove obrade, se vode na ulaze akvizicione kartice. U LabVIEW softveru je realizovan virtuelni instrument za određivanje ugaone pozicije na osnovu očitanih signala. Realizovani enkoder ima mogućnost detekcije grešaka očitavanja koda.

Ključne reči—obrtni optički apsolutni enkoder, pseudoslučajna binarna sekvenca, virtuelna instrumentacija

I. UVOD

Obrtni optički apsolutni pseudoslučajni enkoderi mogu se koristiti za precizno merenje ugaone pozicije, kao i ugaone brzine, u različitim oblastima industrije, liftovima, teleskopima, antenama, nekim računarskim perifernim uređajima (štampači, miševi). Kod ovih enkodera je iskorišćena činjenica da se očitavanjem n susednih bitova n -bitne pseudoslučajne binarne sekvence (PRBS), dobija jedinstvena kodna reč u bilo kom trenutku, koja se koristi za određivanje apsolutne ugaone pozicije [1]-[6]. Za razliku od tradicionalnih apsolutnih pozicionih enkodera, kodne reči su sada uzdužno raspoređene duž kodne trake, pri čemu se dve uzastopne kodne reči razlikuju samo u jednom bitu. Jedna od prednosti apsolutnih pseudoslučajnih pozicionih enkodera u poređenju sa klasičnim apsolutnim enkoderima su to što imaju samo jednu kodnu traku na disku, nezavisno od rezolucije enkodera. Takođe, omogućuju realizaciju lakšeg postupka montiranja enkodera na osovinu motora. Isto tako, kod ovih enkodera se mogu primeniti pouzdane metode provere greške očitavanja koda, čija primena se može iskoristiti za povećanje pouzdanosti rada enkodera. Očitavanje pseudoslučajnog koda se može implementirati serijski, korišćenjem jedne ili dve senzorske glave, ali i paralelno korišćenjem linearnog niza fotodetektora. Glavne funkcionalne komponente pseudoslučajnog apsolutnog pozicionog enkodera su sistem za očitavanje koda [7], [8], metod sinhronizacije očitavanja koda [7], [8], [10], metode detekcije grešaka pri očitavanju koda [9] i metode konverzije

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva, nauka, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [broj ugovora: 451-03-137/2025-03/ 200102]

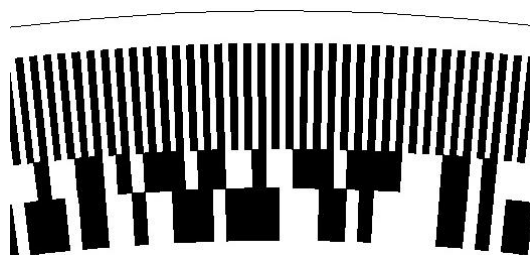
pseudoslučajnog u prirodni kod [11], [12]. Konverzija pseudoslučajnog u prirodni kod se može realizovati paralelno, serijski ili kombinacijom ove dve metode. Prilikom realizacije konvertora koda se traži kompromis između smanjenja vremena konverzije sa jedne strane i hardverske kompleksnosti i cene sa druge strane.

Na početku rada je detaljno opisan postupak izrade staklenog diska apsolutnog pseudoslučajnog pozicionog enkodera, kao i izgled realizovanog diska. Zatim je prikazan postupak očitavanja diska enkodera. Na kraju rada je prikazan virtuelni instrument za određivanje ugaone pozicije na osnovu očitanih signala.

II. POSTUPAK IZRADE STAKLENOG DISKA ENKODERA

U svrhu realizacije optičkog pseudoslučajnog apsolutnog enkodera, najpre je realizovan stakleni disk enkodera prečnika 72.7 mm, koji na sebi ima jednu sinhronizacionu i dve fazno pomerene pseudoslučajne kodne trake. Prva faza realizacije diska enkodera obuhvatala je njegovo projektovanje, crtanje u odgovarajućem softveru, kao i proveru ispravnosti nacrtanog koda. Na Sl. 1 je prikazan uvećan detalj diska enkodera nakon njegove grafičke pripreme u programu AutoCAD. Crna polja (markeri) predstavljaju bitove koji nose informaciju o logičkoj "nuli", dok bela (providna) polja nose informaciju o logičkoj "jedinici".

Realizacija staklenog diska enkodera prečnika 72.7 mm je sprovedena primenom tehnoloških postupaka razvijenih u firmi "EI-OPEK" a.d. Niš, koja dugi niz godina proizvodi optičke enkodere.

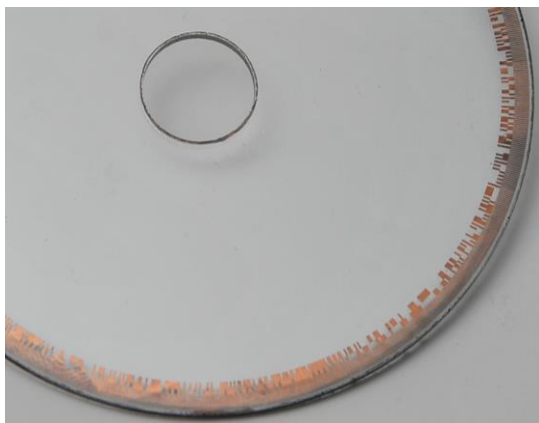


Sl. 1 Raspored kodnih traka na disku pseudoslučajnog enkodera

Kodni disk pseudoslučajnog enkodera ima tri trake: spoljna inkrementalna traka za sinhronizaciju očitavanja pseudoslučajnog koda i dve unutrašnje 10-bitne pseudoslučajne kodne trake međusobno pomerene za 9 bita. Dimenzije diska su prilagođene dimenzijama staklenih diskova i metalnih kućišta dostupnih u asortimanu proizvođača "EI-OPEK" a.d. Niš, dok su širine kodnih traka prilagođene optičkom čitaču koji će biti korišćen za njihovo očitavanje.

Sinhronizaciona i dve pseudoslučajne kodne trake su iscrtane na disku enkodera prečnika 72.7 mm u programu AutoCAD. Ova faza je ustvari pripremna faza za sledeći korak u postupku izrade kodnog diska, a to je štampanje pripremljenog crteža kodnog diska na providnu plastičnu foliju (film) sa rezolucijom štampe 2 milsa (0.0508 mm).

Kodni disk enkodera je napravljen od komada BK7 optičkog stakla debljine 1.6 mm i prečnika 72.7 mm. Prečnik otvora u centru kodnog diska iznosi 12 mm. Na površinu diska, koja je polirana do traženog kvaliteta obrade, nanosi se sadržaj (jedna sinhronizaciona i dve pseudoslučajne kodne trake) u vidu preciznih prozračnih i neprozračnih markera. Šara na disku se izrađuje kombinovanom tehnologijom vakumske depozicije ili hemijskog taloženja slojeva, fotolitografije i hemijskih procesa nagrizanja, Sl. 2. Markeri na disku enkodera dobijeni ovom metodom su precizni, trajni, dobro definisani, stabilni i ne zahtevaju zaštitne filmove.



Sl. 2 Izgled izrađenog staklenog diska enkodera

Redosled tehnoloških procesa prilikom izrade staklenog diska enkodera:

1. Priprema staklenog diska:

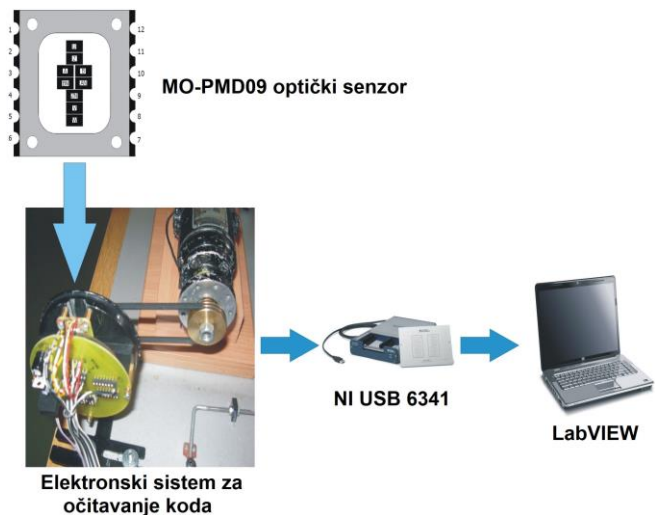
- pranje u organskim rastvaračima
- pranje u neorganiskim rastvaračima

2. Taloženje slojeva:

- taloženje PBS sloja
- taloženje Ag sloja
- provera kvaliteta slojeva

3. Fotolitografija:

- nanošenje fotorezista
- sušenje fotorezista
- eksponiranje UV fluksom
- razvijanje i pečenje fotorezista
- ecovanje slojeva
- provera kvaliteta dobijene šare



Sl. 3 Montiranje diska enkodera i neophodne elektronike u metalnom kućištu, kao i povezivanje sa akvizicionom karticom

Realizovani kodni disk je, u saradnji sa participantom "EI-OPEK" a.d. Niš, montiran na osovinu u odgovarajućem metalnom kućištu enkodera, Sl. 3. Izvršeno je precizno centriranje diska na osovinu enkodera kako bi se što više smanjile greške ekscentriciteta tokom kasnijeg očitavanja koda sa diska enkodera. U kućištu su pripremljena adekvatna mesta za smeštanje neophodne elektronike za očitavanje koda sa kodnog diska i dalju obradu signala.

III. OČITAVANJE DISKA ENKODERA I REALIZACIJA VIRTUELNOG INSTRUMENTA ZA MERENJE UGAONE POZICIJE

Veoma brzi optički senzori sa odličnom osetljivošću na promene svetlosti se mogu naći na tržištu. Za očitavanje koda sa prethodno realizovanog staklenog diska enkodera je odabran čip sa 9 silikonskih P/N fotodioda, a njegov izgled je prikazan na Sl. 3. Optički senzor MO-PMD09 (proizveden od strane fabrike 'Micropto') sadrži četiri fotodiode (A, AN, B, i BN) za diferencijalno skeniranje sinhronizacione trake, jednu fotodiodu ZN za skeniranje pseudoslučajne kodne trake i jednu fotodiodu W za skeniranje fazno pomerene pseudoslučajne kodne trake. Aktivna površina svake fotodiode na čipu optičkog senzora je 0,236 mm². Između fotodioda na optičkom senzoru i diska enkodera se postavlja fazna pločica u cilju usmeravanja infracrvenog svetlosnog snopa koji prolazi od izvora svetlosti kroz prozračne markere diska ka fotodiodama. Izgled fazne pločice zavisi od konkretnog prečnika diska enkodera, širine i rasporeda kodnih traka, kao i od njegove rezolucije.

Signale sa izlaza optičkog senzora je potrebno obraditi, pojačati i pripremiti za ulaze akvizicione kartice, koja će vršiti akviziciju tih signala. Prvi deo elektronskog sistema za obradu signala dobijenog iz optičkog senzora predstavlja konvertor struje kroz inverzno polarizovane fotodiode u odgovarajući analogni izlazni napon. Kvazi-sinusoidalne analogne izlazne signale konvertora struje fotodiode u napon je bilo potrebno zatim uobličiti u digitalni signal.

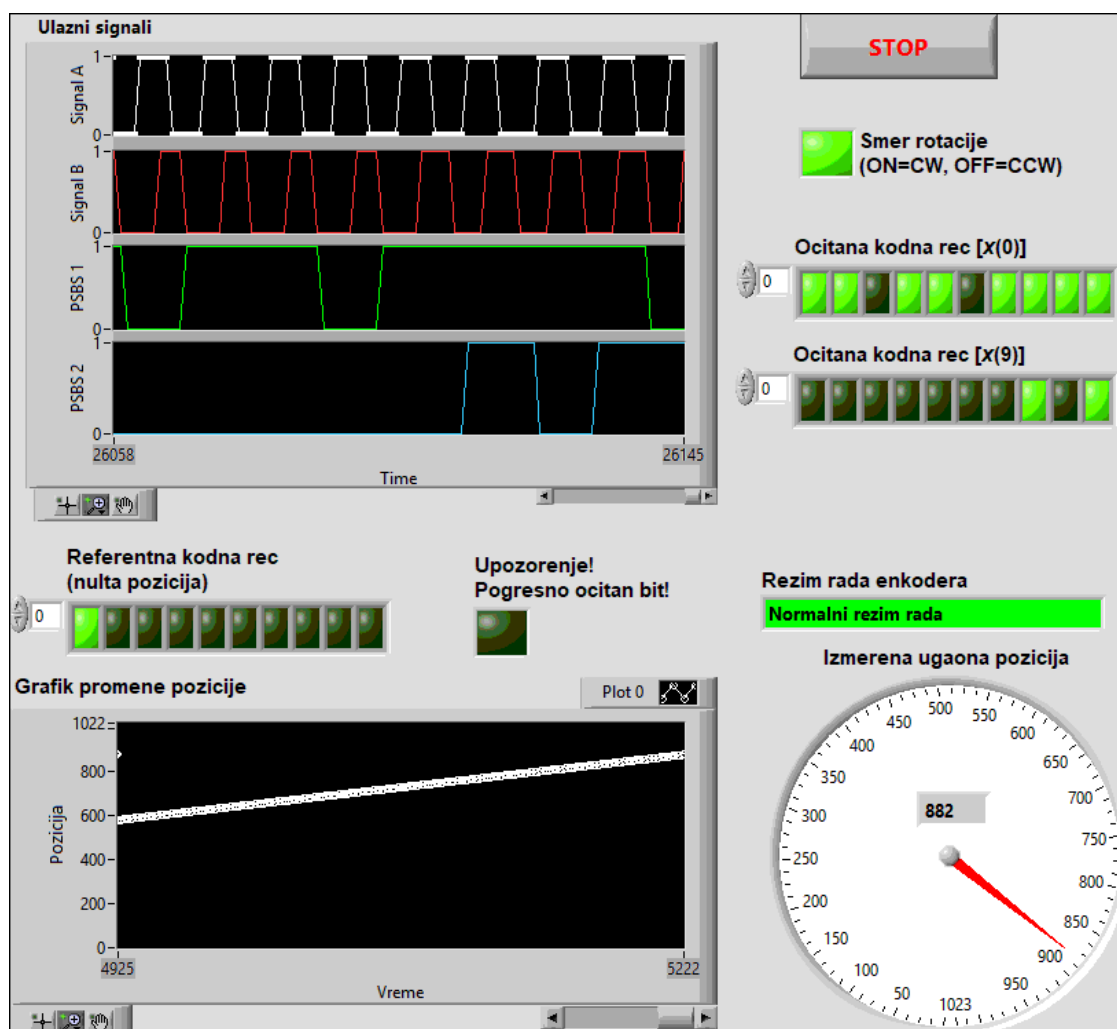
Signali dobijeni elektronskim sistemom optičkog očitavanja koda pseudoslučajnog enkodera se vode na ulaze multifunkcionalne akvizicione kartice NI USB-6341 koja je USB interfejsom povezana sa računarom na kome se izvršava algoritam rada enkodera implementiran u LabVIEW okruženju, Sl. 3. NI USB-6341 akviziciona kartica poseduje 16 analognih

ulaza 16-bitne rezolucije sa brzinom uzorkovanja 500 kS/s, 2 analogna izlaza, 24 digitalnih ulaza/izlaza, 4 brojača, itd. Pomoću dva fazno pomerena signala sa sinhronizacione trake dobija se informacija o smeru obrtanja osovine enkodera istom metodom kao kod inkrementalnih enkodera.

Četiri signala očitanih sa diska enkodera se dovode na digitalne ulaze akvizicione kartice. Uzorkovanje signala se obavlja frekvencijom od 125 kHz, koliko nam maksimalno dozvoljava upotrebljena akviziciona kartica NI USB-6341. Signali se takođe prikazuju i na čartu virtuelnog instrumenta, Sl. 4. Pomoću signala sa sinhronizacione trake definiše se trenutak očitavanja bitova iz signala sa dve pseudoslučajne kodne trake, a određuje se i smer rotacije diska enkodera. Na osnovu očitanih bitova sa dve pseudoslučajne kodne trake korišćenjem dva pomeračka registra formiraju se glavna i kontrolna kodna reč, pri čemu postupak kreiranja kodnih reči u registrima zavisi od smera rotacije diska enkodera. Prilikom startovanja enkodera treba sačekati da se formiraju prve kodne reči kako bi imali informaciju o poziciji, pri čemu je potrebno očitati 10 bita sa pseudoslučajne kodne trake u jednom smeru. Svaki novi očitani bit sa pseudoslučajne kodne trake se koristi za formiranje naredne kodne reči. Nakon formiranja kodnih reči vrši se provera greške očitanih bitova po metodi opisanoj u referenci [9], pri čemu se glavna kodna reč učitava u registar

Fibonačijevog generatora i njemu je potrebno 9 perioda takta kako bi njegov sadržaj bio jednak kontrolnoj kodnoj reči koju formira druga glava za očitavanje koda. U slučaju da nema pogrešno očitanih bitova sa pseudoslučajnih kodnih traka, vrši se određivanje ugaone pozicije primenom konverzije pseudoslučajnog u prirodni kod. Izmerena pozicija se prikazuje na prednjem panelu virtuelnog instrumenta pomoću indikatora čart, instrumenta sa kazaljkom i numeričkog indikatora.

S obzirom da su na disku enkodera dve fazno pomerene pseudoslučajne kodne trake, u slučaju da se detektuje greška u očitavanju bita sa jedne pseudoslučajne kodne trake, enkoder prelazi u režim smanjene pouzdanosti. U režimu smanjene pouzdanosti enkoder koristi pseudoslučajnu kodnu traku sa koje su ispravno očitani bitovi za određivanje ugaone pozicije. U ovom režimu rada se provera greške ostvaruje tako što se očitana kodna reč upoređuje sa generisanom kodnom reči. Kada enkoder formira glavnu i kontrolnu kodnu reč pomoću ispravno očitanih bitova, on se vraća u normalni režim rada. U blok dijagramu je realizovana odgovarajuća logika za identifikovanje pseudoslučajne kodne trake sa koje su pogrešno očitani bitovi. Na ovaj način je unapređen rad enkodera u slučaju pojave pogrešno očitanih bitova u nekom delu pseudoslučajne kodne trake.



Sl. 4 Front panel virtuelnog instrumenta za merenje ugaone pozicije

Unapređenje performansi optičkih apsolutnih pozicionih enkodera je uvek aktuelna oblast istraživanja, koja utiče na podizanje kvaliteta rada brojnih pokretnih sistema u kojima se zahteva tačna, precizna, pouzdana i sa brzim odzivom informacija o ugaonoj poziciji osovine nekog motora. Rad realizovanog enkodera je testiran za različite brzine rotacije osovine motora. Ovako realizovan enkoder ima 10-bitnu rezoluciju određivanja ugaone pozicije. Sa pseudoslučajne kodne trake se mogu očitati 1024 jedinstvenih kodnih reči koje omogućuju merenje najmanjeg ugaonog pomeraja od $360^\circ / 1024 = 0.35^\circ$. Za određivanje tačnosti merenja ugaone pozicije potrebno je ovaj enkoder uporediti sa standardom veće tačnosti ili sa enkoderom veće rezolucije. Eksperimentalno je utvrđeno da realizovani enkoder nema detektovane pogrešno očitane bitove do ugaone brzine od 1800 o/min. Koncept virtuelne instrumentacije omogućuje lakšu dalju nadogradnju i poboljšanje algoritma rada enkodera. Performanse virtuelnog instrumenta zavise od karakteristika upotrebljene akvizicione kartice i performansi računara.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno predstavljen postupak izrade staklenog diska optičkog pseudoslučajnog absolutnog enkodera 10-bitne rezolucije. Zatim je prikazano primenjeno očitavanje koda sa diska enkodera i dobijanje signala koji se vode na ulaze akvizicione kartice. Predstavljen je virtuelni instrument za određivanje ugaone pozicije na osnovu očitanih signala sa diska enkodera. Enkoder može da radi u normalnom režimu rada i u režimu smanjene pouzdanosti u slučaju pojave grešaka prilikom očitavanja koda. Kvalitet očitanih signala sa diska enkodera se smanjuje iznad ugaonih brzina iznad 1800 o/min, pri čemu se sa porastom ugaone brzine sve češće detektuju pogrešno očitani bitovi. Sa istovremenom pojavom grešaka u obe pseudoslučajne kodne trake enkoder može nastaviti da radi u inkrementalnom režimu rada pri čemu bi koristio signale sa sinhronizacione trake. Dalja istraživanja bi mogla da idu u pravcu implementacije kompletnog algoritma rada enkodera u LabVIEW FPGA okruženju ili primenom nekog komercijalnog mikrokontrolera.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays", *Proc. of the IEEE*, vol. 64, no. 12, pp. 1715-1729, 1976. DOI: 10.1109/PROC.1976.10411.
- [2] E.M. Petriu, J.S. Basran, "On the position measurement of automated guided vehicles using pseudorandom encoding", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 799-803, 1989, DOI: 10.1109/19.32196.

- [3] E.M. Petriu, J.S. Basran, F.C.A. Groen, "Automated guided vehicle position recovery", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, no. 1, pp. 254-258, 1990, DOI: 10.1109/19.50460.
- [4] S. Das, B. Chakraborty, "Design of an absolute shaft encoder using optically modulated binary code", *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 12, pp. 4902-4910, 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2834378.
- [5] G. Miljković, D. Denić, "Redundant and flexible pseudorandom optical rotary encoder", *Elektronika IR Elektrotehnika*, Kaunas University of Technology, no. 26(6), pp. 10-16, 2020, ISSN 1392-1215.
- [6] G. Miljković, D. Denić, M. Pešić, M. Arsić, "Improved pseudorandom absolute position encoder with reliable code reading method", *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 12, no. 2, pp. 121-129, 2013, ISSN: 1820-6417.
- [7] M. Arsić, D. Denić, "New pseudorandom code reading method applied to position encoders", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 10, pp. 893-894, 1993, DOI: 10.1049/el:19930596.
- [8] D. Denić, I. Randelović, M. Rančić, "High - resolution pseudorandom encoder with parallel code reading", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 56, no.7, pp. 14-18, 2004.
- [9] D. Denić, M. Arsić, "Checking of pseudorandom code reading correctness", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 21, pp. 1843-1844, 1993, DOI: 10.1049/el:19931226.
- [10] D. Denić, G. Miljković, "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 150, pp. 188-191, 2009, DOI: 10.1016/j.sna.2009.01.015.
- [11] D. Denić, I. Stojković, "Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration", *Electronic Letters*, vol. 46, no. 13, pp. 921-922, 2010, DOI: 10.1049/el.2010.0792.
- [12] D. Denić, M. Dinčić, G. Miljković, Z. Perić, "A contribution to the design of fast code converters for position encoders", *International Journal of Electronics*, Taylor & Francis, vol. 103, issue 10, pp. 1654-1664, 2016, DOI: 10.1080/00207217.2016.1138521.

ABSTRACT

The paper first describes the process of making a glass disc of an optical pseudorandom encoder with a resolution of 10 bits. One synchronization track and two phase-shifted 10-bit pseudorandom code tracks are located on the disc. After that, the procedure of reading the code from the implemented disk encoder is presented. The read signals, after their processing, are fed to the inputs of the acquisition card. A virtual instrument for determining the angular position based on the read signals was realized in the LabVIEW software. The implemented encoder has the ability to detect code reading errors.

REALISATION AND READOUT OF A GLASS DISC PSEUDORANDOM ABSOLUTE ENCODER

Goran Miljković, Ivana Randelović, Dragan Denić, Aleksandar Jocić, Jelena Jovanović