

Očitavanje pseudoslučajnog koda pomoću linearnog niza fotodetektora kod pseudoslučajnih pozicionih enkodera

Ivana Randelović, Dragan Denić i Goran Miljković

Apstrakt— U radu se predlaže primena linearnog niza fotodetektora za paralelno očitavanje pseudoslučajnog binarnog koda kod apsolutnih pseudoslučajnih pozicionih enkodera. Predloženom metodom očitavanja koda bi se eliminisala potreba za inicijalnim kretanjem osovine enkodera prilikom njegovog startovanja u slučaju serijskog očitavanja koda. Urađena je simulacija rada predloženog rešenja pozicionog enkodera primenom softverskog paketa LabVIEW. Digitalna simulacija je realizovana u formi dva programa, pri čemu jedan program simulira sistem za očitavanje koda pseudoslučajnog pozicionog enkodera, dok drugi program simulira funkcionisanje elektronskog bloka takvog enkodera. Predstavljena je analiza primene komercijalno dostupnog linearnog niza fotodetektora za očitavanje koda sa realizovanog staklenog diska enkodera na kome je pseudoslučajna kodna traka.

Ključne reči— pseudoslučajni pozicioni enkoder, merenje pozicije, paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda, linearni niz fotodetektora, virtuelna instrumentacija, LabVIEW.

I. UVOD

Za određivanje pozicije pokretnih sistema u industriji sve više se koriste pseudoslučajni pozicioni enkodori koji predstavljaju značajan pravac u razvoju novih tipova apsolutnih enkodera. Enkodori sa pseudoslučajnim kodom omogućuju visoku tačnost i dobru pouzdanost. Prilikom razvoja pseudoslučajnih enkodera potrebno je podjednako dobro realizovati sve njegove sastavne komponente: realizacija kodnog diska shodno optičkom čitaču koji će se koristiti, način očitavanja pseudoslučajnog koda [1], metoda skeniranja koda, konverzija pseudoslučajnog u prirodni kod [2], implementacija detekcije grešaka očitavanja koda [3], kao i postupak određivanja nulte pozicije prilikom montaže enkodera na osovinu motora [4].

Primena pseudoslučajnih pozicionih enkodera je široka. Mogu se naći u raznim oblastima: za merenje pozicije u industriji i robotici, pozicioniranje kranova i dizalica [5], za kontrolu kretanja automatski vođenih mašina [6], itd.

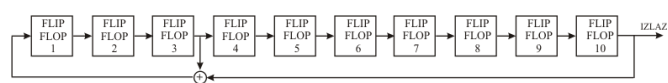
Prvi korak u realizaciji pseudoslučajnog pozicionog enkodera jeste nanošenje pseudoslučajne binarne sekvence

Ivana Randelović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: ivana.randjelovic@elfak.ni.ac.rs).

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

Goran Miljković – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: goran.miljkovic@elfak.ni.ac.rs).

(PRBS) na kodnu traku pri čemu je sekvenca prethodno generisana uz pomoć pomeračkog registra sastavljenog od n flip flopova i odgovarajuće povratne sprege definisane na osnovu tabele primitivnih polinoma. Paralelno, na sve stepene registra (flip-flobove) se dovodi signal takta i naredno stanje pomeračkog registra zavisi od prethodnog stanja i od definisane povratne sprege. Međutim, prilikom generisanja pseudoslučajne sekvence nije dozvoljeno pojavljivanje stanja u kome su svi stepeni pomeračkog registra na nuli, pošto generator ne može da izađe iz tog stanja. Primenjuje se linearna povratna sprega koja definiše ulazni bit pomeračkog registra kao linearnu funkciju prethodnog stanja registra. Naziv “linearna” potiče od činjenice da je povratna sprega izvedena primenom linearnih operacija, npr. sabiranjem po modulu 2, nad sadržajem memorijskih elemenata pomeračkog registra. Samo povratna sprega definisana na osnovu tabele primitivnih polinoma, [7], generisaće na izlazu pomeračkog registra sekvencu maksimalne dužine 2^n-1 . Ovako generisana pseudoslučajna binarna sekvenca rezolucije n je maksimalne dužine 2^n-1 i sadrži 2^n-1 različitih kodnih reči dužine n . Preciznost merenja pozicije u pokretnim sistemima je veća ukoliko je veća rezolucija n . Kada je reč o industrijskim pokretnim sistemima sve više se povećavaju zahtevi što se tiče tačnosti i pouzdanosti pozicionog enkodera, a rezolucija koja se zahteva je reda $n)10$. U radu, na slici 1. prikazano je generisanje pseudoslučajne binarne sekvence maksimalne dužine, za $n=10$ i odgovarajuće povratne sprege dobijene primenom primitivnog polinoma $h(x) = x^{10} + x^3 + 1$.



Sl. 1. Generisanje pseudoslučajne binarne sekvence za $n=10$.

Obrtni optički enkodori visoke rezolucije, kao i linearni pozicioni enkodori mogu da koriste metod pseudoslučajnog kodiranja. Određivanje pozicije kod ovih enkodera se zasniva na “osobini prozora” pseudoslučajne binarne sekvence [7], pri čemu prozor dužine n koji se kreće duž pseudoslučajne binarne sekvence izdvaja jedinstvenu kodnu reč. Susedne kodne reči koje su raspoređene na kodnoj traci se međusobno razlikuju samo u jednom bitu, što je omogućilo serijsko očitavanje koda. Međutim, serijsko očitavanje pseudoslučajnog koda zahteva početno inicijalno kretanje prilikom startovanja enkodera kako bi se formirala prva

validna kodna reč, zbog čega su takvi enkoderi poznati na tržištu pod imenom "virtuelni enkoderi". Kako bi dizajnirali enkoder koji je potpuno apsolutni u svim segmentima svog funkcionisanja, u ovom radu se uvodi paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda. Odnosno, cilj je da se informacija o apsolutnoj poziciji dobija odmah i prilikom samog startovanja enkodera, i prilikom nestanka napajanja enkodera kao i u toku obrtanja osovine enkodera.

U prvom delu rada je objašnjen princip paralelnog očitavanja pseudoslučajnog koda korišćenjem linearnog niza fotodetektora. Pri tome je objašnjena procedura određivanja apsolutne pozicije, kao i problemi koji se pri tome javljaju. Istaknuta su ograničenja i prednosti korišćenja ovakvog načina funkcionisanja pseudoslučajnog enkodera. U drugom delu rada je predstavljena simulacija očitavanja koda korišćenjem LabVIEW okruženja, kao i simulacija rada elektronskog bloka ovakvog enkodera po prijemu signala iz sistema za očitavanje koda. Eksperimentisano je sa različitim putanjama kretanja, kao i sa različitim situacijama koje se mogu javiti pri funkcionisanju enkodera u industrijskom okruženju. Takođe, prikazana je i mogućnost primene linearnog niza fotodetektora, koji se trenutno mogu naći na tržištu, za paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda na realizovanom staklenom kodnom disku.

II. PARALELNO OČITAVANJE PSEUDOSLUČAJNOG KODA KOD POZICIONIH ENKODERA NA BAZI LINEARNOG NIZA FOTODETEKTORA

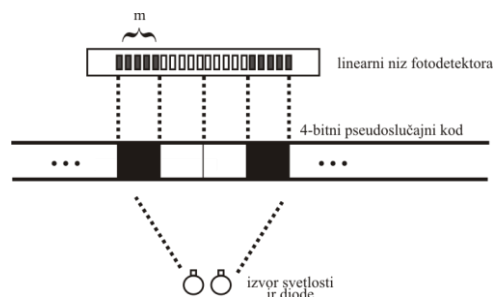
Primena pozicionog pseudoslučajnog enkodera u aplikacijama gde je neprihvatljivo postojanje početnog inicijalnog kretanja kako bi se formirala prva apsolutna pozicija je dovelo do ideje primene metode paralelnog očitavanja pseudoslučajnog koda. Paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda se može realizovati pojedinačnim fotodiodama, ali je njihova fotoosetljiva oblast reda 0.3 mm što sa kućištem bude 4-5 mm, pri čemu se značajno ograničava realizacija enkodera visoke rezolucije. Veće rezolucije se mogu postići primenom detektora sa integrisanim nizom fotodetektora na jednom čipu [8, 9], ili primenom CCD senzora [10]. Brzina očitavanja CCD senzora je manja od brzine očitavanja niza fotodetektora, pa se CCD senzori mogu koristiti za enkodere u aplikacijama gde imamo manje brzine rotacije osovine.

Na tržištu se mogu naći komercijalni integrisani linearni nizovi fotodetektora sa različitim širinama fotoosetljivog elementa, odnosno različitim razmacima između susednih fotodetektora koji su reda 400 μm , 100 μm , 50 μm , 25 μm itd. Neki od proizvođača ovakvih linearnih nizova fotodetektora su: iC-Haus GmbH [14], Hamamatsu company, [15], Sensors Unlimited [16].

Osnovni princip funkcionisanja pseudoslučajnog enkodera sa paralelnim očitavanjem na bazi primene linearnog niza fotodetektora je prikazan na slici 2. i sastoji se u sledećem.

Primenjuje se kodni disk transparentnog tipa gde se sa jedne strane pseudoslučajne kodne trake nalazi izvor svetlosti, infracrvene diode, a sa druge strane kodne trake integrisano

kolo sa linearnim nizom fotodetektora. Za određivanje apsolutne pozicije potrebno je očitati n uzastopnih bitova sa pseudoslučajne kodne trake.



Sl. 2. Primer korišćenja linearnog niza fotodetektora za očitavanje 4-bitnog pseudoslučajnog koda

Kodna traka je tako projektovana da je širina bita, zbog pouzdanosti očitavanja, značajno veća od širine fotoelementa linearnog niza fotodetektora. Odnosno, jedan bit sa pseudoslučajne kodne trake čitaju m susednih fotodetektora. Na primer, ako je $m=5$ u idealnom slučaju dobili bismo ovakvo očitavanje kodne reči $\{1001\}$ sa 4-bitne pseudoslučajne kodne trake pomoću linearnog niza fotodetektora $\{\dots 1111110000000000111111\dots\}$. Može se uočiti da je broj uzastopnih jedinica i uzastopnih nula po jednom bitu upravo m . U realnom sistemu, broj uzastopnih jedinica i nula će varirati od broja m , $\{\dots 1111111000000000111110\dots\}$, zbog vibracija, temperature, prašine, itd. Kako je poznat razmak između susednih bitova, određuje se gruba apsolutna pozicija prikupljanjem susednih n bitova i njihovom konverzijom iz pseudoslučajnog u prirodni kod.

Očitavanja pseudoslučajnog bita koja se prikupljaju sa krajnje desnim fotodetektorima omogućavaju dodatnih $(m-1)$ bitova koji se mogu iskoristiti za određivanje fine pozicije pokretnog sistema. Time bi se mogla povećati rezolucija pseudoslučajnog pozicionog enkodera. Takođe, smer kretanja pokretnog sistema se može odrediti praćenjem promena vrednosti fine pozicije. Gruba pozicija se određuje uvek kada se javi skok fine pozicije. Što se tiče određivanja smera kretanja pokretnog sistema može se zaključiti da prilikom kretanja pokretnog sistema udesno, fina pozicija skače od vrednosti "fina pozicija= $m-1$ " na "fina pozicija= 0 ". Kada je skok detektovan, fina pozicija dobija vrednost 0, i sledi određivanje grube pozicije. U slučaju kretanja pokretnog sistema ulevo, fina pozicija skače od vrednosti "fina pozicija= 0 " na "fina pozicija= $m-1$ ". Gruba pozicija se određuje kada je vrednost "fina pozicija= $m-1$ " i smanjuje se za jedan.

Algoritmi rada enkodera na osnovu kojih je i urađena digitalna simulacija rada predloženog enkodera detaljno su opisani u referencama [11, 12] i omogućavaju opsežna istraživanja različitih varijanti rešenja enkodera pre njihove praktične realizacije. Algoritam u referenci [11] je u kasnijim istraživanjima modifikovan u pogledu dobijanja

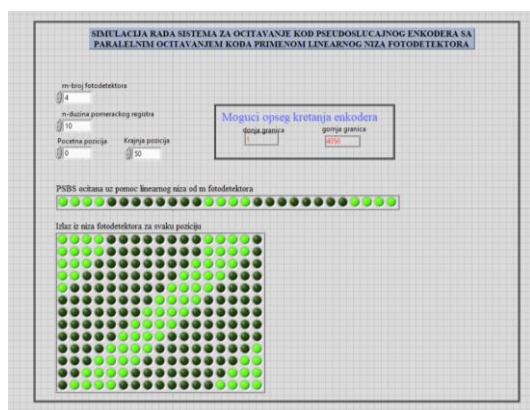
jednostavnijeg rešenja i kao takav prikazan u referenci [12] pri čemu je pokazano da u predloženom rešenju greške koje uzrokuju skok fine pozicije ne utiču na performanse sistema.

III. DIGITALNA SIMULACIJA RADA PREDLOŽENOG REŠENJA ENKODERA SA PARALELNI OČITAVANJEM PSEUDOSLUČAJNOG KODA

U cilju poboljšanja funkcionalnosti i brzine algoritma potrebno je izvršiti veći broj eksperimenata. Istraživanja su vršena na polju gde realna proba određenih rešenja zahteva velika ekonomska sredstva. Razvoj pozicionog pseudoslučajnog enkodera korišćenjem realnih komponenti enkodera bi bio skup i vremenski duži postupak, zbog čega se primenjuje računar i LabVIEW okruženje u cilju dobijanja raznih varijanti rešenja enkodera na brži i jeftiniji način. U tom pogledu, za istraživanje je najbolje posedovati dobar eksperimentalni sistem. Kvalitetnim programima za simulaciju kretanja pokretnog sistema, generisane su što tačnije informacije koje bismo dobili na izlazima sistema za očitavanje kod realnog enkodera. Dobijene informacije se zatim koriste kao ulaz programa koji simulira rad elektronskog bloka i algoritma rada enkodera. Programi za simulaciju rada enkodera su realizovani primenom softverskog paketa LabVIEW, [13].

Simulacija počinje startovanjem prvog programa koji generiše niz digitalnih signala koji se upisuju u datoteku, odakle se mogu očitati drugim programom za simulaciju rada elektronskog bloka enkodera. U samoj izradi simulatora enkodera najpre se krenulo od pretpostavke da sistem radi idealno, odnosno bez grešaka u očitavanju koda. Zatim su u simulator implementirani različiti ometajući faktori koji bi se javili u realnim industrijskim uslovima i određeno je kako to utiče na izlazne signale simulatora.

Dakle, u okviru razvijenog rešenja, dat je primer za pseudoslučajnu sekvencu sa potrebnim brojem bitova $n = 10$, broj fotodetektora po jednom bitu koda je $m = 4$, i zadati opseg kretanja (0–50), slika 3.

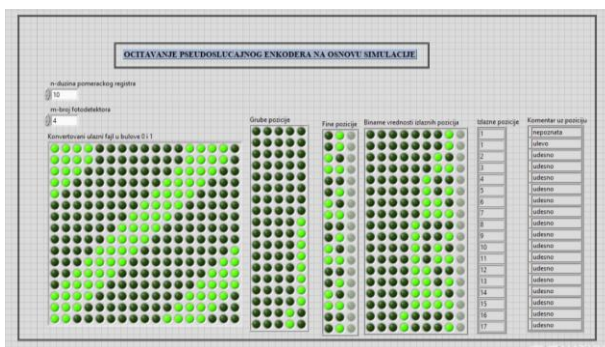


Sl. 3. Front panel simulatora rada sistema za očitavanje kod pseudoslučajnog pozicionog enkodera sa paralelnim očitavanjem koda

Podaci se upisuju u datoteku a zatim se startovanjem drugog programa određuje pozicija pokretnog sistema, slika 4.

Trebalo bi naglasiti da su grube i fine pozicije date u dekadnom sistemu, čije se vrednosti prevode u binarni oblik. Na vrednost grube pozicije u binarnom obliku dopisuje se binarna vrednost fine pozicije i prevodenjem u dekadni sistem dobija se trenutna vrednost izlazne pozicije. Na primer: ako je “gruba pozicija=7”, “fina pozicija=0”, binarne vrednosti su “gruba pozicija=111 i “fina pozicija=000”. Izlazna pozicija je sada binarno “111000” što bi u dekadnom sistemu odgovaralo poziciji $p = 56$. Smer kretanja pokretnog sistema jeste u formi “komentar uz poziciju”.

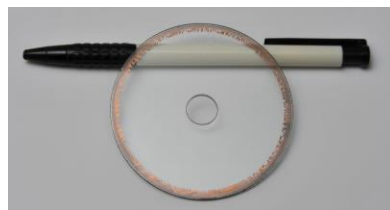
Velike su prednosti ovakvog realizovanog sistema. Testiranje određenog rešenja je veoma slično kao i kod realnog pozicionog enkodera. Rezultati simulacije se mogu prikazati ili odštampati što obezbeđuje brze korekcije eventualnih grešaka u testiranom rešenju.



Sl. 4. Front panel simulatora elektronskog bloka pseudoslučajnog pozicionog enkodera sa paralelnim očitavanjem koda

IV. ANALIZA METODE PARALELNOG OČITAVANJA PSEUDOSLUČAJNOG KODA PRIMENOM LINEARNOG NIZA FOTODETEKTORA KOD PREDLOŽENOG ENKODERA

U cilju dalje praktične provere predloženog rešenja enkodera za koje je urađena digitalna simulacija korišćen je stakleni disk enkodera i data je analiza primene linernog niza fotodetektora konkretnih proizvođača. Kodni disk je izrađen od optičkog stakla, odgovarajućeg kvaliteta obrade, debljine 1,6 mm i prečnika 72,7 mm. Prečnik otvora u centru kodnog diska iznosu 12 mm. Na površinu kodnog diska, koja je polirana do traženog kvaliteta obrade, nanosi se kodna traka u vidu preciznih podela, odnosno šara, sačinjenih od prozračnih i neprozračnih polja, kao što je prikazano na slici 5. Rezolucija pseudoslučajne trake je 10 bita, odnosno svaka pseudoslučajna traka sadrži 1024 polja. Polje jednog bita na pseudoslučajnoj kodnoj traci je širine 201 μm i visine 800 μm .



Sl. 5. Fotografija realizovanog staklenog diska pseudoslučajnog pozicionog enkodera

Kodni disk je urađen za serijsko očitavanje pseudoslučajnog koda, poseduje dodatnu pseudoslučajnu kodnu traku i sinhronizacionu traku, koje nisu potrebne za analizu ovde predloženo rešenja očitavanja koda.

Za analizu očitavanja pseudoslučajnog binarnog koda je izabran senzor, LC/LSC serije, proizvođača Sensors Unlimited [16], čitač sa linearnim nizom veoma brzih InGaAs fotodetektora pri čemu je razmak između fotodetektora 25 μm dok je broj fotodetektora 512. Analizom širine kodnog bita i širine fotodetektora ustanovljeno je da je za očitavanje jednog bita sa pseudoslučajne kodne trake potrebno $m=4$ fotodetektora. Odnosno, za očitavanje 10-bitnog pseudoslučajnog koda bi se koristilo 40 susednih fotodetektora. Na osnovu kataloških podataka, brzina ovih senzora je 91,912 kHz dok je vreme očitavanja 10,88 μs pri takt frekvenciji od 12,5 MHz. Ukoliko bi se koristio integrisani niz fotodetektora drugog proizvođača, konkretno InGaAs G7151-16 proizvođača Hamamatsu company [15], koji sadrži 16 fotodetektora i razmak između senzora iznosi 100 μm tada bi bilo potrebno $m=2$ fotodetektora da bi se očitao jedan bit sa pseudoslučajne kodne trake na staklenom disku enkodera.

Istraživanja vezana za paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda na bazi linearnog niza fotodetektora kod pozicionog enkodera su samo započeta. Primenom konkretnih integrisanih nizova fotodetektora poznatih proizvođača upotrebljenih za paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda otvara se mogućnost i praktične realizacije enkodera kao pozicionog enkodera opšte namene visoke rezolucije.

V. ZAKLJUČAK

Danas, sve je više prisutan zahtev u industriji za pouzdanim i tačnim informacijama o poziciji pokretnog sistema. Za potrebe razvoja pseudoslučajnih pozicionih enkodera implementirana su dva programa primenom softverskog paketa LabVIEW pri čemu jedan program simulira sistem za očitavanje koda pseudoslučajnog pozicionog enkodera, dok drugi program simulira funkcionisanje elektronskog bloka takvog enkodera. Predstavljena su neka trenutno dostupna kola lineranih nizova fotodetektora na tržištu i data je analiza primene nekih od njih za predloženo rešenje enkodera. Potrebno je još dosta eksperimentisanja kako bi se došlo do konačnog praktičnog rešenja ovakvog enkodera, pri čemu bi on mogao da ima niz prednosti u odnosu na neka prethodna rešenja u literaturi. Predloženi enkoder bi bio apsolutni enkoder gde se ne zahteva početno inicijalno kretanje i koji omogućuje primenu metoda za povećanje njegove rezolucije korišćenjem informacija o finoj poziciji sistema. Sa druge strane, kao nedostatak ovako realizovanog rešenja bi bila veličina senzora kao i sporije očitavanje senzora.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] D. Denić, G. Miljković, "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", *Sensor. Actuat. A-Phys.* vol. 150, pp. 188-191, 2009.
- [2] D. Denić, I. Stojković, "Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration", *Electron. Lett.* vol. 46, pp. 921-922, 2010.
- [3] D. Denić, M. Arsić, "Checking of pseudorandom code reading correctness", *Electron. Lett.* vol. 29, pp. 1843-1844, 1993.
- [4] D. Denić, I. Ranđelović, G. Miljković, "Recent trends of linear and angular pseudorandom encoder development", *Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Taormina, Sicily, Italy, pp. 746-750, 2006.
- [5] I. Stojković, G. Miljković, D. Denić, D. Živanović, "Application of pseudorandom position encoder for crane positioning", *Proceedings of the International Scientific Conference UNITECH 2017*, Gabrovo, Bugarska, vol. 3, pp. 289-292, 2017.
- [6] E.M. Petriu, J.S. Basran, F.C.A. Groen, "Automated guided vehicle position recovery", in *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 39, pp. 254-258, 1990.
- [7] F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays", *Proceeding of IEEE*, Vol. 64, No. 12, pp. 1715-1728, 1976.
- [8] J.T.M. Stevenson and J.R. Jordan, "Absolute position measurement using optical detection of code patterns", *J. Phys E. Sci. Instrum.* 21, pp. 1140-1145, 1988.
- [9] M. Durana, P. Gallay, P. Robert, F.C. Pruvot, "Novel type submicrometre resolution pseudorandom position optical encoder", *Electronic Letters*, Vol 29, No 20, pp. 1792-1794, 1993.
- [10] H. Khalfallah, E.M. Petriu, F.C.A. Groen, "Visual position recovery for an automated guided vehicle", *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, Vol. 41, No. 6, pp. 906-910, 1992.
- [11] D. Denić, M. Rančić, G. Miljković, "Pseudoslučajni apsolutni pozicioni enkoder visoke rezolucije", *Zbornik radova 47. Konferencije ETRAN*, str. 452-455, 2003.
- [12] D. Denić, I. Ranđelović, M. Rančić, "High-resolution pseudorandom encoder with parallel code reading", *Electronics and electrical engineering Nr 7(56)*, Kaunas, Litvania, pp. 9-14, 2004.
- [13] LabVIEW, *User's Manual*, National Instruments, www.ni.com, USA, 2010.
- [14] www.ichaus.com
- [15] www.hamamatsu.com
- [16] www.sensorsinc.com

ABSTRACT

The paper proposes the application of linear array of photodetectors for parallel code reading of pseudorandom binary code in absolute pseudorandom position encoders. The proposed method of code reading would eliminate the need for the initial movement of the shaft of encoder during starting in the case of serial code reading. A simulation of the proposed solution of position encoder using the LabVIEW software package was performed. Digital simulation was realized in the form of two programs, where one program simulates a code reading system of a pseudorandom position encoder, while the other program simulates the operation of an electronic block of such an encoder. An analysis of the application of a commercially available linear array with photodetectors for code reading, realized from glass disk of an encoder with pseudorandom code track, is presented.

A code reading based on linear array of photodetectors at pseudorandom position encoders

Ivana Ranđelović, Dragan Denić i Goran Miljković