

Holovi senzori u zadacima beskontaktnog određivanja pozicije kod pravolinijskog kretanja predmeta rada u proizvodnom procesu

Laslo Tarjan, Ivana Šenk, Sabolč Horvat, Dragana Oros, Igor Baranovski

Katedra za mehatroniku, robotiku i automatizaciju,
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija

laci@uns.ac.rs, ivanas@uns.ac.rs, horvat@uns.ac.rs, spawn@uns.ac.rs, baranovski@uns.ac.rs

Sažetak—Praćenje trenutne pozicije predmeta rada, kao i pozicije alata, tokom proizvodnje je od velike važnosti u automatizovanim sistemima, jer poznavanje trenutne pozicije povećava mogućnosti upravljačke jedinice za optimizacijom rada automatizovanog sistema. Holovi senzori omogućavaju beskontaktno detektovanje jačine magnetnog polja, i primenjivi su u aplikacijama za detektovanje blizine, pozicije, brzine i merenje struje u provodnicima. U radu je istraživana mogućnost primene ovog tipa senzora za beskontaktno praćenje trenutne pozicije predmeta rada tokom pravolinijskog kretanja kroz proizvodni proces.

Ključne riječi – praćenje pozicije; Hall senzor; Neodijumski magneti; optimizacija proizvodnje(key words)

I. UVOD

Kretanje proizvoda (predmeta rada) unutar proizvodnog pogona je neminovnost kada se proizvodnja obavlja na više različitih automatizovanih mašina u više koraka. U nekim slučajevima se radi o premeštanju proizvoda od alata do alata, tj. od mašine do mašine, a u nekim slučajevima o transportu na veće udaljenosti unutar proizvodnog procesa, tj. sa tačke primarne obrade, gde je predmet rada (deo) nastao, do tačke u kojoj se više predmeta rada (delova) sklapa u jednu celinu (proizvod). Kretanje predmeta rada kroz proizvodni proces opslužuju razni pokretni stolovi i trake, roboti i manipulatori.

Savremeni način proizvodnje po zahtevu kupca, kada kupac direktno ili indirektno može da utiče na krajnji proizvod [1] (npr. nivo opremljenosti automobila), zahteva rad sa puno manjih potproizvoda koji se tokom montaže spajaju u jednu celinu. Za optimizaciju samog proizvodnog procesa neophodno je pratiti trajanje ciklusa operacija samih mašina, trenutnu zauzetost mašina i putanju predmeta rada tokom kretanja kroz pogon (vreme u prenosu i trenutnu poziciju). Trenutna pozicija predmeta rada i potrebno vreme za stizanje do sledeće pozicije može biti od velikog značaja upravljačkoj jedinici koja sinhronizuje rad mašina, prilikom odlučivanja koji predmet rada da se uzme u obradu ukoliko mašina opslužuje više proizvodnih linija.

Automatizovano praćenje predmeta rada kroz proizvodni proces je kompleksan problem i zahteva kombinaciju više tehnologija, i to u zavisnosti od cilja tog praćenja. U slučaju identifikacije predmeta rada i praćenja informacija o njemu

koristi se RFID tehnologija (eng. *Radio-Frequency Identification* – identifikacija putem radio frekvencije), identifikacija zasnovana na nekom optičkom sistemu kao što je mašinska vizija, ili označavanje bar kodovima i 2D kodovima [2], [3]. U slučaju određivanja trenutne pozicije mogu se koristiti sistemi zasnovani na: mašinskoj viziji, primeni senzorskih mreža u svrhu određivanja pozicije u zatvorenom prostoru, senzorskog merenja razdaljine, kao i detekcijom prisutnosti na određenoj unapred poznatoj poziciji [4]. Svaki od navedenih načina određivanja pozicije ima svoje prednosti a i mane. U slučaju mašinske vizije prednost je što je sistem odvojen od samog predmeta rada i samo se na osnovu njegove slike određuju njegove karakteristike i pozicija, tj. ne mora se na predmet rada ili na prenosu paletu dodavati dodatni deo samo za ovu svrhu, a nedostatak je što se rad mora obavljati pod kontrolisanim uslovima osvetljenja. Primena RFID-a, bar kada ili korišćenje senzora za merenje razdaljine ili prisutnosti zahteva dodavanje dodatnog dela na predmet rada ili na prenosu paletu za ovu svrhu (npr. na predmet rada se lepi RFID tag ili bar kod), ali su ovi sistemi dosta otporniji na spoljašnje smetnje u vidu osvetljenja, ali ne i na prisutnost metala koji u mnogome može ometati rad RFID sistema ili senzorske mreže.

Holovi senzori (senzori bazirani na merenju Holovog napona [5]) omogućavaju beskontaktnu detekciju pozicije na osnovu merenja jačine magnetnog polja, i primenjivi su u aplikacijama za detektovanje pozicije, brzine, blizine kao i za merenje struje u provodnicima [6]. Ukoliko se u/na paletu postavi stalni magnet, pomoću ovog tipa senzora moguća je detekcija jačine magnetnog polja postavljenog permanentnog magneta, iz koje se može proračunati udaljenost predmeta rada od samog senzora.

U radu je istraživana mogućnost primene senzora na bazi Holovog efekta, u kombinaciji sa Neodijumskim permanentnim magnetom, za beskontaktno praćenje trenutne pozicije predmeta rada tokom pravolinijskog kretanja, što je čest slučaj u proizvodnim sistemima.

II. HOLOVI SENZORI

Ukoliko se provodna traka ili poluprovodnička pločica, kroz koju uzdužno protiče električna struja, nađe u spoljašnjem magnetnom polju koje ima pravac normalan na njenu površinu,

između bočnih ivica nastaje potencijalna razlika, tzv. Holov napon. Pojava je nazvana po američkom naučniku Edvinu Herbertu Holu (engl. *Edwin Herbert Hall*) koji je 1879. godine prvi opisao ovu pojavu [5], [7].

Intenzitet Holovog napona je proporcionalan gustini magnetnog fluksa i struje. Amplituda Holovog napona V_H zavisi od struje u provodniku i jačine magnetnog polja, i može se opisati izrazom (1) [7], [8]:

$$V_H = \frac{K_H \cdot B \cdot I}{d} \quad (1)$$

gde je:

- V_H – Holov napon,
- K_H – Holova konstanta,
- B – gustina magnetnog fluksa,
- I – struja kroz provodnik,
- d – debljina provodnika.

Gustina magnetnog fluksa se može izraziti i preko jačine magnetnog polja H i permeabilnosti sredine μ (2):

$$B = \mu \cdot H \quad (2)$$

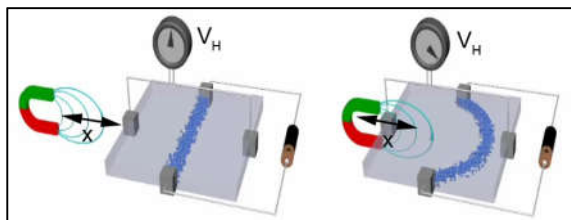
gde se H izražava u amperima po metru, odakle se vidi zavisnost Holovog napona V_H i rastojanja x između generatora magnetnog polja (npr. permanentnog magneta) i Holovog senzora (Sl. 1). Kako se magnet približava i udaljava od senzorske ćelije, na izlazu senzora se menja analogni naponski signal na osnovu kog je moguće odrediti rastojanje magneta od senzora, a ukoliko se uzme u obzir da se kretanje koje se prati dešava samo po jednoj koordinati po kojoj se prati signal sa senzora, lako je odrediti trenutnu poziciju magneta pa samim tim i objekta za koji je on prikazan.

Uopšteno Holovi senzori su predviđeni za vrlo ograničeni pomak, tako da rezolucija merenja nekog većeg rastojanja zavisi od broja upotrebljenih senzora i gustine raspodele duž putanje kretanja praćenog objekta [8].

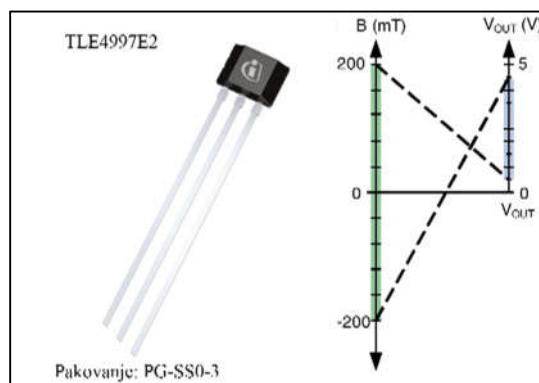
A. Senzorska jedinica

Holovi senzori se proizvode u dve osnovne kategorije:

- *binarni senzori* – koji služe za detekciju prisustva magnetnog polja (npr. kod detekcije pozicije klipnjače pneumatskih cilindara sa ugrađenim permanentnim magnetom), ili
- *analogni* – kada je izlaz senzora proporcionalan jačini



Slika 1. Zavisnost Holovog napona V_H od rastojanja x između senzora i permanentnog magneta (Izvor: *Fraunhofer IIS*)



Slika 2. Holov senzor TLE4997 sa bipolarnim invertovanim izlazom [9]

detektovanog magnetnog polja. Izlaz senzora može biti neka analogna veličina (naponski ili strujni signal) ili digitalni broj koji se očitava bilo komunikacijom sa senzorom ili preko PWM signala (eng. *Pulse Width Modulation* – Impulsno Širinska Modulacija).

U zadacima praćenja pozicije u nekom kontinualnom opsegu pogodniji je analogni tip senzora, a u zadacima detekcije prisustva binarni tip senzora.

Na tržištu je moguće naći veliki broj različitih varijanti relativno jeftinih Holovih senzora (negde figuriše i naziv magnetni senzor). Za analizu u ovom radu odabran je senzor proizvođača *Infineon Technologies AG* iz familije *TLE499x*, koji su analogni senzori sa varijacijom izlaza: naponski, strujni, PWM ili komunikacioni (SPC¹ ili SENT²). Konkretno, senzor *TLE4997* [9] namenjen je za praćenje linearne ili ugaone pozicije u aplikacijama fine automatizacije. Merenje se vrši na rezoluciji od 12 bit-a: za pun opseg jačine magnetnog polja od ± 200 mT (0.097656 mT/bit), srednji opseg od ± 100 mT (0.048828125 mT/bit), ili mali opseg od ± 50 mT (0.024414063 mT/bit). Opseg se bira prilikom kalibracije senzora. U senzor je ugrađena digitalna temperaturna kompenzacija, kao i 20-bitni DSP (eng. *Digital Signal Processing*) zadužen za obradu signala sa mogućnošću memorisanja svih neophodnih kalibrišućih parametara. Napon napajanja senzora je u opsegu od 4,5 do 5,5 V (4-7 V u proširenom opsegu). Temperaturni opseg rada je od -40 do 150 °C. Na Sl. 2 prikazan je izgled senzora kao i način formiranja izlaznog analognog signala u zavisnosti od jačine magnetnog polja. Pošto se radi o bipolarnom invertovanom izlazu, jačina magnetnog polja od 200 mT (ili veća) generisaće izlazni napon od 0 V, a polje od -200 mT (ili manje) signal od 5 V. Merni opseg senzora je ograničen na -200 do 200 mT, ali sama jačina magnetnog polja koja sme da deluje na senzor nije ograničena [9], što je bitan podatak u konkretnoj primeni. Ako se uzme u obzir da se

1 SPC (eng. short PWM codes)

2 SENT (eng. single edge nibble transmission)

TABELA I. JAČINE MAGNETNOG POLJA RAZLIČITIH VRSTA PERMANENTNIH MAGNETA

Magnet	B [T]	H [kA/m]	BHmax [kJ/m ³]
Nd ₂ Fe ₁₄ B ^a	1.0–1.4	750–2000	200–440
Nd ₂ Fe ₁₄ B ^b	0.6–0.7	600–1200	60–100
SmCo ₅ ^a	0.8–1.1	600–2000	120–200
Sm(Co, Fe, Cu, Zr) ₇ ^a	0.9–1.15	450–1300	150–240
Alnico ^a	0.6–1.4	275	10–88
Sr-ferrite ^a	0.2–0.78	100–300	10–40

a. dobijen sinterizacijom
b. dobijen livenjem

merenje vrši na rezoluciji od 12 bita dobija se da je osetljivost izlaza senzora 0,12207 mV po 0,097656 mT magnetnog polja.

B. Permanentni magneti

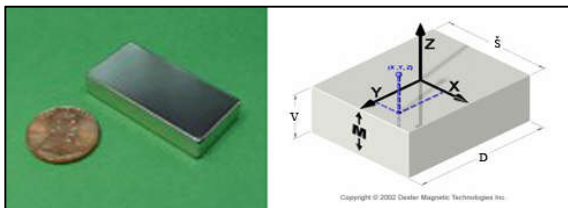
Da bi se magnetno polje moglo detektovati pomoću Holovog senzora iz veće udaljenosti, neophodno je koristiti jak permanentni magnet, koji bi obezbedio magnetno polje, koje je dovoljno veliko da se detektuje i sa veće razdaljine. Neodijumski magneti (Nd₂Fe₁₄B) imaju znatno veće magnetno polje po jedinici površine od ostalih vrsta stalnih magnetata (Tabela I). Na primer magnet tipa N5211, sa rezidualom induktivnošću $B_r = 1450 \text{ mT}$, koja je dimenzija 20x15x10 mm (Sl. 3: D -dužina x δ -širina x V -visina), na svojoj površini (prema Z osi sa Sl. 3.) ima katalogsku vrednost magnetnog polja $B = 498 \text{ mT}$, a 3 mm od površine magnetata prema Z osi (Sl. 3) $B = 345.6 \text{ mT}$ [10].

III. REZULTATI SIMULACIJE I IDEJNO REŠENJE SISTEMA

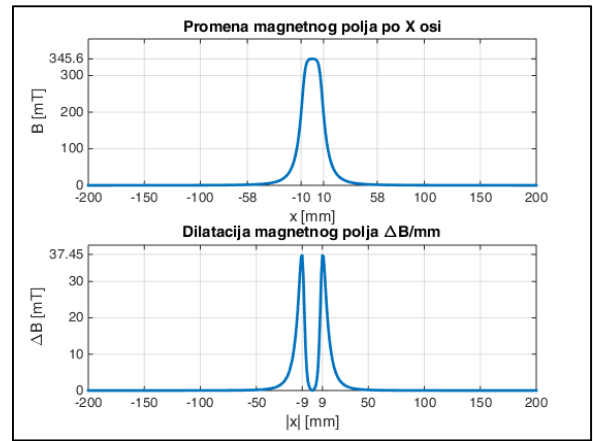
A. Promena magnetnog polja

Ukoliko se izvrši simulacija promene magnetnog polja za pomenuti Neodijumski magnet tipa N5211 dimenzija 20x15x10 mm (Sl. 3: D x δ x V), čije se merenje vrši u tačkama $Z = 3 \text{ mm}$, $X = -200$ do 200 mm , na osnovu podataka [10], magnetno polje će se menjati od 345,611 mT (u tački $X=0$, $Y=0$, $Z=3 \text{ mm}$) do 0,041 mT (u tačkama $X=\{-200, 200\}$, $Y=0$, $Z=3 \text{ mm}$). Dijagram promene magnetnog polja $B[mT]$ za opseg parametara $X=\{-200 \text{ do } 200 \text{ mm}\}$ prikazan je na Sl. 4 (gore), na kojoj se vidi da je magnetno polje simetrično po X koordinati. Dilatacija magnetnog polja u svakom mm (ΔB) prikazana je na Sl. 4 (dole). Ako se posmatraju suvi podaci o dobijenim dilatacijama magnetnog polja u određenim tačkama na dijagramu sa Sl. 4 (dole), vidi se da je za:

- $|X| = \{0 \text{ do } 50 \text{ mm}\}$ dilatacija jačine polja se drastično menja sa porastom razdaljine;



Slika 3. Veličina Neodijumskog magnetata (levo, izvor: K&J Magnetics), dimenzije i ose pomeranja od magnetata (desno, Izvor: dextermag.com)



Slika 4. Promena magnetnog polja (gore), i dilatacija magnetnog polja u svakom mm (dole) za magnet tipa N5211 dimenzije 20x15x10 mm

- $|X| = \{45 \text{ do } 50 \text{ mm}\}$ je $\Delta B = \{0,25 \text{ do } 0,16 \text{ mT}\}$;
- $|X| = \{51 \text{ do } 58 \text{ mm}\}$ je $\Delta B = \{0,153 \text{ do } 0,091 \text{ mT}\}$;
- $|X| = \{\text{od } 160 \text{ do } 200 \text{ mm}\}$ je $\Delta B = 0,001 \text{ mT}$.

B. Integracija Holovog senzora

Ako se uzme u obzir da je osetljivost odabranog Holovog senzora (TLE4997) u punom opsegu ($\pm 200 \text{ mT}$), tada je:

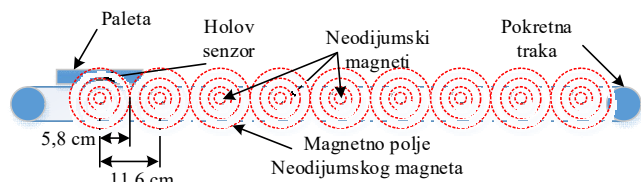
$$\Delta V_{out} = \frac{0,12207 \text{ mV}}{0,097656 \text{ mT}} \quad (3)$$

Na osnovu podataka sa Sl. 4 i zavisnosti izlaznog napona senzora i promene jačine magnetnog polja (3) se vidi da se pomenuti senzor u kombinaciji sa odabranim Neodijumskim magnetom tipa N5211 dimenzija 20x15x10 mm može koristiti za jednoznačno određivanje trenutne pozicije predmeta rada, koji se prati tokom pravolinijskog kretanja po X koordinati, u opsegu od $\pm 58 \text{ mm}$. Potrebno je napomenuti da će za pozicije između $\pm 10 \text{ mm}$ senzor davati isti izlazni signal, jer je u ovom opsegu magnetno polje veće od 200 mT .

C. Sistem za praćenje pozicije

Na osnovu simulacije promene magnetnog polja (Sl. 4) i načina rada odabranog Holovog senzora (TLE4997) zaključeno je da je praćenje trenutne pozicije predmeta rada tokom linearnih kretanja u proizvodnji moguće na dva načina:

1. *Sa jednim senzorom i više magnetata* (Sl. 5.) – ukoliko se duž linije kretanja postavi više fiksiranih permanentnih magnetata, tako da se magnetna polja preklapaju, što omogućava stalno prisustvo dovoljno jakog magnetnog polja i praćenje promene polja, čijom analizom je moguće doći do trenutne pozicije, a na paletu koja prevozi predmet rada se postavi Holov senzor koji putuje zajedno sa paletom.
2. *Sa više senzora i jednim magnetom* (Sl. 6.) – u ovom slučaju se permanentni magnet postavlja na paletu koja se kreće, a duž linije kretanja se postavljaju senzori koji će detektovati promenu magnetnog polja tokom kretanja palete pored njih.



Slika 5. Sistem za praćenje pozicije sa jednim senzorom i više stalnih magneta

U oba slučaja razmak između fiksiranih permanentnih magneta u prvom slučaju ili postavljenih senzora u drugom slučaju treba da je takav da je moguće izmeriti drugu jačinu polja za svaku interesantnu veličinu pomeraja. Npr. ukoliko merenje pomeraja treba da je sa rezolucijom od 1 mm, za pomenute konfiguracije bi trebalo odabrati razmak od 116 mm (dva puta po 58 mm), jer do 58 mm svaki postavljeni magnet daje dovoljno polje za jednoznačnu detekciju, odnosno svaki senzor će sa te razdaljine moći detektovati polje. U prvom slučaju, kada se koristi jedan „putujući senzor“ poteškoću čini to što mora da se obezbedi način priključivanja senzora na ostatak sistema (napajanje i prenos informacija do upravljačke jedinice) jer se radi o pomerajućem senzoru u odnosu na ostatak dela sistema. U drugom slučaju postoji veći broj senzora čije signale treba istovremeno obraditi, što može da dovede do poteškoća koje se pravilnim projektovanjem upravljačkog sistema mogu zaobići (npr. korišćenjem multiplexerskog pristupa ili upotrebom FPGA kola [8], [11]).

IV. ZAKLJUČAK

U radu je istraživana mogućnost primene Holovog senzora u kombinaciji sa Neodijumskim permanentnim magnetom za beskontaktno praćenje trenutne pozicije predmeta rada tokom pravolinijskog kretanja kroz proizvodni proces. Urađena je simulacija promene magnetnog polja za Neodijumski magnet tipa N5211 dimenzija 20x15x10 mm (Sl. 3: $D \times \delta \times V$) na osnovu podataka [10]. Na osnovu dobijenih podataka i analize rada odabranog Holovog senzora, predložene su dve konfiguracije sa kojima je ovaj koncept izvodljiv. Predočeni su i eventualni problemi u realizaciji ovih rešenja.

Ako se uzme u obzir da je na svakih 116 mm potreban po jedan Neodijumski magnet (sa cenom od oko 2\$³) i jedan senzor (cena oko 4\$⁴), dobija se prihvatljivo rešenje za precizno praćenje pozicije za oko 20\$ po dužnom metru. Naravno, ovde se radi o kontinualnom praćenju pozicije predmeta rada bez mogućnosti detekcije nekih identifikacionih parametara, ali bi se ovakav sistem lako mogao kombinovati sa RFID sistemom koji bi obezbedio i dodatne informacije o praćenom predmetu rada.

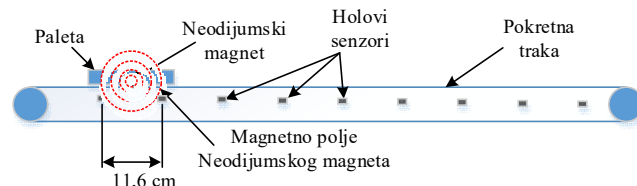
U sklopu daljeg rada planira se izrada eksperimentalnog sistema koji bi omogućio i praktičnu proveru simulacijom dobijenih rezultata.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekata TR 35001, „Automatizovani sistemi za identifikaciju i praćenje objekata u industrijskim i neindustrijskim sistemima“ i III 46001, „Razvoj

³ Izvor: aliexpress.com

⁴ Izvor: infineon.com



Slika 6. Sistem za praćenje pozicije sa više senzora i jednim stalnim magnetom

i primena novih i tradicionalnih tehnologiju u proizvodnji konkurentnih prehrambenih proizvoda sa dodatom vrednošću za domaće i svetsko tržište – STVORIMO BOGATSTVO IZ BOGATSTVA SRBIJE“, koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] J. M. Todorović, *Savremeni menadžment proizvodnje: upravljanje i JUST-IN-TIME*. Nauka, 1992.
- [2] I. Šenk, G. Ostojić, L. Tarjan, S. Stankovski, and M. Lazarević, “Food Product Traceability by Using Automated Identification Technologies,” in *Technological Innovation for the Internet of Things - 4th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2013, Costa de Caparica, Portugal, April 15-17, 2013. Proceedings*, 2013, pp. 155–163.
- [3] L. Tarjan, I. Šenk, R. Kovač, S. Horvat, G. Ostojić, and S. Stankovski, “Automatic identification based on 2D barcodes,” *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 4, pp. 151–157, 2011.
- [4] L. Gogolak, S. Pletl, and D. Kukolj, “Neural Network-based Indoor Localization in WSN Environments,” *ACTA Polytech. HUNGARICA*, vol. 10, no. 6, pp. 221–235, 2013.
- [5] P. Yedamale, “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals,” *Microchip Technology Inc.*, pp. 1–20, 2003.
- [6] M. Božović, “Holovi strujni senzori,” in *13. Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2014, 19. - 21. mart, 2014*, vol. 13, pp. 1100–1105.
- [7] L. Tarjan, “Povišenje efikasnosti rada linearnih aktuatora primenom upravljanja baziranog na FPGA - Doktorska disertacija,” Univerzitet u Novom Sadu, 2015.
- [8] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press LLC, 1999.
- [9] Infineon, “TLE4997 - Programmable Linear Hall Sensor,” 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/clxTXn> (pristup: februar 2017).
- [10] Dexter, “Field Calculations for a Rectangle,” *DEXTER magnetic technologies*. [Online]. Available: <https://goo.gl/C9TUPx>. [Accessed: 16-Feb-2017].
- [11] L. Tarjan, I. Šenk, D. Oros, and S. Horvat, “Mogućnosti primene FPGA za unapređenje industrijskih upravljačkih sistema,” in *Zbornik radova - 13. Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, 2014*, vol. 13, pp. 571–575.

ABSTRACT

Tracking the current position of workpieces and tools in the production processes is of high significance in automated

systems, as knowing the current position can increase the possibilities of the control unit for optimization of automated systems. Hall sensors enable contactless detection of magnetic field strength, and can be applied for proximity switching, positioning, speed detection and electrical current sensing in conductors. This paper researches the possibilities for application of this type of sensors for contactless tracking of the current workpiece position during its linear movement in the production process.

**HALL SENSORS IN CONTACTLESS POSITION
DETERMINATION TASKS WITH LINEAR
MOVEMENT OF WORKPIECES IN THE
PRODUCTION PROCESS**

Laslo Tarjan, Ivana Šenk, Sabolč Horvat,
Dragana Oros, Igor Baranovski