

Strujni senzor kao indirektni merač aktivnosti radnog alata u proizvodnom procesu

Nenad Jovičić, Nemanja Janković

Apstrakt— U radu je predstavljena mogućnost primene informacija o strujnom opterećenju električnog pogona u sklopu radnog alata kao indirektnog merila aktivnosti proizvodnog procesa. Strujni senzor se odlikuje relativno niskom cenom i moguće ga je jednostavno ugraditi na bilo koju industrijsku mašinu sa električnim pogonom. Analizom izmerenog profila struje mogu se dobiti različite informacije o toku samog procesa, koje zavise od konkretne primene, a koje mogu da uključuju intenzitet rada radnog alata, osobine materijala koji se obrađuje, količinu obrađenog materijala i sl. što u krajnjoj liniji sve vodi prema mogućnosti pouzdane procene produktivnosti. U radu je predstavljeno rešenje implementirano na jednom tipičnom primeru iz drvne industrije.

KLjučne reči— strujni senzor, Industrija 4.0, produktivnost.

I. UVOD

Industrija 4.0 nameće potrebu da se sve više ide u pravcu digitalizacije sa krajnjim ciljem unapređenja proizvodnih procesa i to sa različitim stanovišta: povećavanje efikasnosti, smanjenje troškova, predikcija otkaza i prilagođavanje održavanja i slično [1].

U modernim industrijskim pogonima dominantno su zastupljene visoko automatizovane industrijske mašine koje su kontrolisane programabilnim logičkim kontrolerima (PLC). Kontroleri su opremljeni tipičnim industrijskim interfejsima i njihove osobine i performanse su prilagođene standardnim aplikacijama. Moderni kontroleri imaju i odgovarajuće komunikacione interfejse preko koji se mogu povezivati na industrijske magistrale i preko njih integrisati u sisteme za daljinsko praćenje i upravljanje proizvodnjom (SCADA).

U modernoj industriji je krajem osamdesetih godina prošlog veka uveden pojam kojim se meri ukupna efikasnost opreme (OEE – Overall Equipment Efficiency) [2]. Ukupna efikasnost mašine, procesa i slično može definisati proizvodnom efikasnosti u smislu prisutnosti, efikasnosti u smislu aktivnosti i efikasnosti u smislu kvaliteta. Efikasnost prisutnosti na primer može da ukazuje koliko procenata radnog vremena je mašina uključena, efikasnost aktivnosti govori koliko procenata prisutnog vremena je radni alat aktivan a efikasnost u smislu kvaliteta pokazuje koji je prosečni kvalitet proizvedenih artikala u odnosu na unapred postavljenu normu.

Jasno je da moderne mašine kroz svoje upravljačke PLC kontrolere mogu da obezbede informacije o merenjima koja su potrebna za proračun tih parametara.

Sa druge strane, u većini tradicionalnih ali i značajnom broju modernih proizvodnih industrijskih pogona postoji potreba da se neke, često ključne faze u postupku proizvodnje obavljaju ručno, korišćenjem poluautomatskih ili ručnih električnih mašina i alata. Takve mašine i alati po pravilu nemaju uređaje kojima se prati njihova aktivnost, jer po prirodi stvari njihovim radom upravlja čovek.

Potpuni nadzor nad industrijskim procesom iziskuje da se i takvi procesi digitalizuju, tj. da se prate njihovi kvantitativni pokazatelji u smislu ranije definisane OEE.

Problemi praćenja aktivnosti takvih mašina se susreću u tekstilnoj industriji [3][4], drvnoj industriji [5], prehrambenoj industriji [6] i sl.

U ovom radu je predstavljen novi pristup rešavanju problema praćenja neautomatizovanih mašina u drvnoj industriji koji se zasniva na analizi trenutne potrošnje struje. Postoje slična istraživanja sprovedena u tekstilnoj industriji koja kao rezultat donose procenu aktivnosti operatera [3], veštine operatera i težine obavljenog posla [7], kao i procenu kvaliteta proizvoda [4].

Analiza vremenski promenljivih signala koji su korelisani sa proizvodnim procesom može da se koristi između ostalog i za detekciju anomalija u radu [8], što je korisno za prediktivno održavanje. U radu [9] se predlaže upotreba strujnog senzora i predlaže algoritam obrade signala koji na osnovu spektralnog sadržaja signala vrši distinkciju različitih stanja mašine, kao što se aktivno stanje, radno stanje i sl.

Za razliku od tekstilne industrije, specifičnost drvne industrije je izražena varijabilnost u karakteristikama ulazne sirovine, koja se ogleda u promenljivoj tvrdoći, vlažnosti i zastupljenosti nepravilnosti u drvetu što utiče na proces obrade. Drugim rečima, ne postoje dva komada drveta koja su istih karakteristika i koja će ostaviti isti strujni tj. energetski potpis u procesu obrade.

U radu je predstavljen primer praćenja rada jedne tipične mašine iz drvne industrije, dat je principijelni algoritam obrade signala, predstavljeni su statistički rezultati i predložene su kvantitativne mere koje se mogu koristiti za analizu dobijenih signala i njihovo međusobno poređenje.

II. OPIS PROBLEMA

Na slici 1 prikazana je industrijska vertikalna tračna testera, nezamenljiva mašina koja se susreće u svim pogonima za obradu drveta. Mašina je opremljena električnim pogonom, ali

Nenad Jovičić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: nenad@etf.bg.ac.rs).

Nemanja Janković – Microsoft Development Center Serbia, Španskih boraca 3, 11070 Beograd, Srbija (e-mail: jjankovicnemanja@gmail.com).

procesom rezanja upravlja isključivo ljudski operater. U cilju potpunog praćenja celog proizvodnog procesa, potrebno je pratiti protok materijala i kroz ovakve mašine. Problem kod ove i sličnih mašina je što bi dodavanje senzora koji bi kontaktno ili beskontaktno merili kretanje drveta smetalo manipulaciji, usporavalo proces rada ili dovodilo do zaglavljivanja materijala i do zastoja u radu. Ideja preuzeta iz drugih industrija je da se merljivo opterećenje pogonskog agregata, u ovom slučaju električnog motora, koristi kao indirektna mera protoka materijala, ali i drugih parametara kao što su tvrdoća materijala i slično.



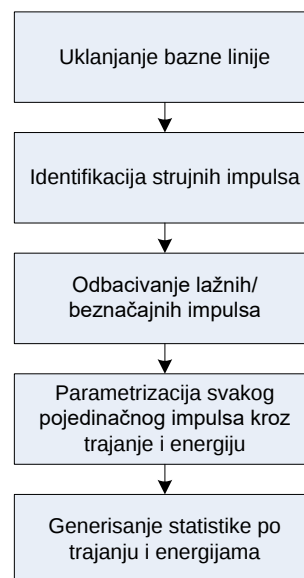
Sl. 1. Vertikalna tračna testera koja se koristi za dodatnu ručnu obradu drveta. Levo je prikazan crtež cele mašine a desno je prikazana fotografija jedne takve mašine u toku rada.

Implementacija sistema podrazumeva ugradnju strujnog senzora na napajanje pogonskog motora. Iako su motori uglavnom trofazni, kod dobro izbalansiranih pogona dovoljno je pratiti jednu fazu napajanja.

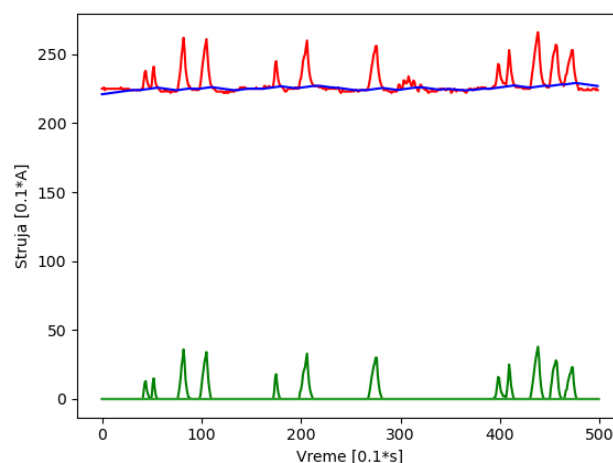
III. ALGORITAM

Na slici 2 prikazan je dijagram toka algoritma za analizu strujnog profila, dok je na slici 3 prikazan reprezentativni uzorak strujnog signala pogonskog motora mašine u trajanju od 50s.

Prva faza u implementaciji algoritma je uklanjanje komponente struje koja nije posledica samog procesa rezanja. Ta komponenta postoji usled različitih uzroka od kojih su najznačajniji električni gubici pogonskog električnog motora i mehanički gubici usled same mašine. Ta komponenta, nazvana bazna linija, se može ukloniti različitim metodama obrade signala i u ovom slučaju je korišćena metoda spajanja lokalnih minimuma signala. Na slici 3 bazna linija je prikazana plavom bojom. Sledeća faza je oduzimanja bazne linije od originalnog signala, i odbacivanje lažnih ili beznačajnih impulsa nakon čega ostaju samo impulsi koji se smatraju validnim pokazateljima reza (zelena boja).



Sl. 2. Algoritam obrade vremenske sekvence strujnih impulsa.



Sl. 3. Vremenski dijagram struje u toku 50s rada na mašini. Crveno – struja, plavo – bazna linija, zeleno – strujni impulsi nakon uklanjanja bazne linije i filtriranja lažnih impulsa.

Treća faza je analiza svakog pojedinačnog impulsa i određivanje njegovih jedinstvenih parametara. U ovom radu su kao parametri izabrani trajanje impulsa i integral impulsa. Integral strujnog impulsa se računa kao

$$II = \int i(t) dt \quad (1)$$

i ima dimenziju As. Ukoliko se pretpostavi da je efektivni napon napajanja mašine konstantan, što je razumna pretpostavka u modernim industrijskim pogonima, može se doći do fizički smislene mere a to je energija impulsa

$$E_{imp} = U_{eff} II = U_{eff} \int i(t) dt \quad (2)$$

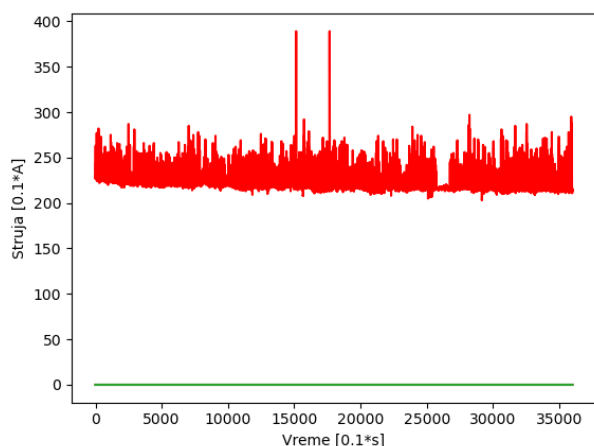
Ovo je vrlo prihvatljiva mera, jer je električna energija potrošena na jedan rez svakako proporcionalna količini fizičkog rada potrošenog da se obradi tj. prereže komad drveta. Striktno govoreći, energija samog reza je zbog gubitaka manja tako da je potrebno uvesti dodatnu kalibracionu konstantu nakon čega dolazimo do izraza

$$E_{rez} = k_r U_{eff} \int i(t) dt = k \int i(t) dt. \quad (3)$$

Poslednja faza je generisanje statističkog izveštaja po izabranim parametrima nad čitavim ansamblom identifikovanih strujnih impulsa, tj. njima ekvivalentnih rezova.

IV. REZULTATI

Na slici 4 je prikazan tipičan vremenski dijagram profila struje u toku jednočasovnog rada mašine. Dva strujna impulsa koji znatno odskakuju po amplitudi su najverovatnije posledica preopterećenja pogonskog motora usled nailaska na čvor izuzetne tvrdoće ili neki drugi defekt. Takođe, u drugoj polovini posmatranog vremenskog intervala može se primetiti kratak period sa odsustvom strujnih impulsa. To je realna situaciju kada se pravi pauza bez zaustavljanja pogonskog motora, najverovatnije usled potrebe transporta ulaznog ili obrađenog materijala.



Sl. 4. Vremenski dijagram struje u toku jednočasovnog rada mašine.

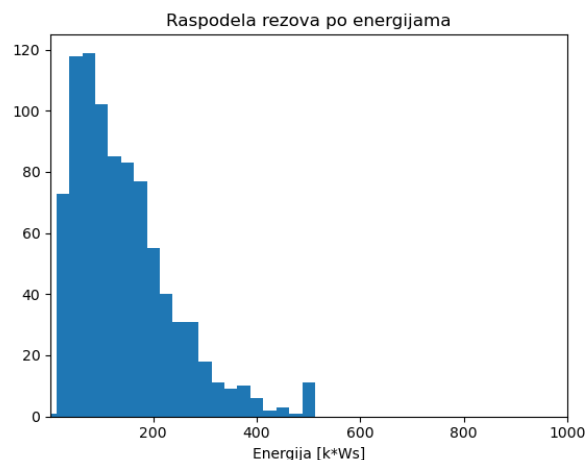
Obradom prikazanog signala dobija se zbirni statistički izveštaj, prikazan u tabeli I, gde se može videti da je za sat vremena napravljeno 888 rezova, čije je ukupno trajanje iznosilo 1030 s. Izračunata je i ukupna energija u relativnim jedinicama (konstanta proporcionalnosti se dobija kalibracijom mašine) koja iznosi 141406 k*Ws.

TABELA I
ZBRINI STATISTIČKI IZVEŠTAJ

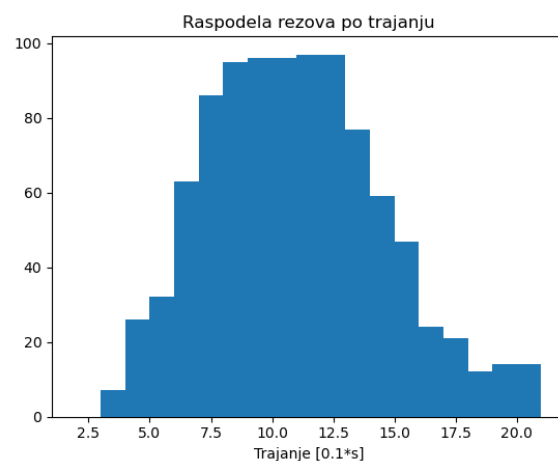
Ukupno vreme rada [s]	3600
Broj rezova	888
Trajanje rezova [s]	1030
Energija rezova [k*Ws]	141406

Izračunati zbirni parametri se mogu koristiti da se napravi gruba procena aktivnosti mašine i operatera. Ipak, praksa je pokazala da je za potrebe što boljeg normiranja proizvodnog zadatka, u nekim slučajevima potrebno dobiti i informacije o broju kratkih rezova, broju dugih rezova, količini rezanja kroz tvrdo drvo i kroz meko drvo i sl. Za potrebe generisanja

takvih posebnih izveštaja može da posluži ukupna statistika svih rezova, dobijena u poslednjoj fazi algoritma, koja se može analizirati na različite načine. Na slikama 5 i 6 je prikazan jedan način detaljnijeg statističkog prikaza korišćenjem histograma koji daju raspodelu rezova po trajanju i po energijama.



Sl. 5. Raspodela rezova po energijama.



Sl. 6. Raspodela rezova po trajanju.

U zavisnosti od konkretnog zahteva, statistički profili se mogu obrađivati na različite načine i mogu se izvlačiti različiti zaključci. Na primer, na osnovu slike 5 se primećuje da je u toku rada bilo više rezova sa manjim energijama, što znači da su rezani mekši komadi drveta. Sa druge strane, sa slike 6 se može se primetiti tipičan oblik normalne raspodele pri čemu je rez najčešće trajanja od oko 1.1 s.

V. ZAKLJUČAK

Predstavljeno rešenje se pokazalo kao dobra mera za procenu ukupnog protoka materijala. Prednosti su izuzetna jednostavnost ugradnje i niska cena. Takođe, sistem ni na koji način ne smeta radu rukovaoca, tako da niti je smanjena produktivnost niti bezbednost na radu.

Mana rešenja je što u nekim situacijama ima malu tačnost. Pokazuje se da na kalibracionu konstantu k, koja u krajnjoj liniji određuje relaciju između pravog protoka materijala,

utiče više nekorelisanih faktora kao što su varijacije efektivnog napona, oštrina alata, vlažnost sirovine i slično.

Ipak, navedeni problemi ukazuju na moguće pravce unapređenja algoritma u vidu uvođenja kompenzacionih informacija.

LITERATURA

- [1] Lasi, Heiner, et al. "Industry 4.0." *Business & information systems engineering* 6 (2014): 239-242.
- [2] Nakajima, Seiichi. "Introduction to TPM: total productive maintenance.(Translation)." Productivity Press, Inc., 1988, (1988): 129.
- [3] Jung, Woo-Kyun, et al. "Smart sewing work measurement system using IoT-based power monitoring device and approximation algorithm." *International Journal of Production Research* 58.20 (2020): 6202-6216.
- [4] Atta, Raghied M., Ihab El-Sayed, and Abdel Aleem H. Mohamed. "Fabric properties measurements using real-time sewing machine motor current signature." *Measurement* 173 (2021): 108669.
- [5] Landscheidt, Steffen, and Mirka Kans. "Automation practices in wood product industries: Lessons learned, current practices and future perspectives." *The 7th Swedish Production Symposium SPS*, 25-27 October, 2016, Lund, Sweden. Lund University, 2016.
- [6] Suprem, Abhijit, Nitaigour Mahalik, and Kiseon Kim. "A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector." *Computer Standards & Interfaces* 35.4 (2013): 355-364.
- [7] Jung, Woo-Kyun, et al. "Remote sensing of sewing work levels using a power monitoring system." *Applied Sciences* 10.9 (2020): 3104.
- [8] Esling, Philippe, and Carlos Agon. "Time-series data mining." *ACM Computing Surveys (CSUR)* 45.1 (2012): 1-34.
- [9] Cheng, Chen-Yang. "A novel approach of information visualization for machine operation states in industrial 4.0." *Computers & Industrial Engineering* 125 (2018): 563-573.

ABSTRACT

The paper presents the possibility of applying information about the current load of the electric drive as part of the work tool as an indirect measure of the activity of the production process. The current sensor is characterized by a relatively low price and it is possible to easily install it on any industrial machine with electric drive. By analyzing the measured current profile, different information can be obtained about the course of the process itself, which depends on the specific application, and which may include the intensity of work of the working tool, the properties of the material being processed, the amount of processed material, etc. which ultimately leads to the possibility of reliable assessment of productivity. The paper presents a solution implemented on a typical example from the wood industry.

Current sensor as an indirect measurer of the activity of working tool in the production process

Nenad Jovicic, Nemanja Jankovic