

Novo rešenje sistema upravljanja poprečnog rezača u fabrici kartona

A new solution for the control system of the cross cutter in the board factory

Neša Rašić

*Akademija tehničko-umetničkih
strukovnih studija
Odsek Visoka škola elektrotehnike i
računarstva
Beograd, Srbija
nesa.rasic@viser.edu.rs*

Aleksandra Grujić

*Akademija tehničko-umetničkih
strukovnih studija
Odsek Visoka škola elektrotehnike i
računarstva
Beograd, Srbija
aleksandrag@viser.edu.rs*

Milan Bebić

*Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
bebic@etf.bg.ac.rs*

Sadržaj — U radu je predstavljen novi sistem upravljanja realizovan u fazi rekonstrukcije i modernizacija poprečnog rezača Valmet 14.5 u fabrici kartona „Umka” u blizini Beograda, Srbija [1]. Novi sistem upravljanja je realizovan pomoću PLC sa integrisanim PROFInet i PROFIBUS komunikacijskim protokolima.

Poprečni rezači služe za poprečno sečenje kartonske ili papirne trake u komade unapred zadate dužine, pri njenom odmotavanju sa rolne. Osnovni zahtevi koji treba da se zadovolje su:

- Pouzdan rad;
- Rad sa velikim brzinama trake u procesu sečenja;
- Visoka tačnost dužine odsečenih komada;
- Kvalitetno sečenje, bez gužvanja, kidanja, ili gnječenja na mestu sečenja.

U radu su prikazane karakteristike i tehnički zahtevi osnovnih funkcionalnih celina poprečnog rezača kartonske trake sa gledišta upravljanja. Opisan je i analiziran sinhronizovan rad [2, 3] glavnih elektromotornih pogona napajanih iz frekventnih pretvarača kojim se obezbeđuje podešavanje obodne brzine noževa rezača, što je neophodno za pravilan rad. U radu su prikazani rezultati snimljeni na rekonstruisanom postrojenju poprečnog rezača.

Ključne reči—poprečni rezač, sistem upravljanja, PLC, PROFInet, PROFIBUS, frekventni pretvarač

I. FUNKCIONALNE CELINE I OPIS RADA POPREČNOG REZAČA

Postrojenja poprečnih rezača (letećih makaza) koriste se u kontinualnim procesima proizvodnje papira ili kartona. U tehnološkim procesima proizvodnje kartona, poprečni rezači nalaze se na njegovom kraju, gde se materijal (karton) u obliku dugačke trake seče na kraće komade (tabake). Kontinuitet procesa zahteva da se ovo sečenje obavlja bez zaustavljanja, ili usporavanja kretanja trake koja se seče.

Na poprečnom rezaču koji je predstavljen u ovom radu, proces sečenja počinje od postavljanja rolne sa trakom koja se seče, na dvostrukom odmotraču. U početnom ciklusu traka

sa rolne se ručno odmotra i provuče preko niza nepogonskih valjaka do para vučnih valjaka (mehanizam koji vuče traku) koji čine pogon prese. Brzina obrtanja valjaka prese određuje brzinu rada poprečnog rezača, čija maksimalna vrednost za poprečni rezač, opisan u ovom radu, iznosi 300 (m/min). Traka koju presa vuče i odmotava se sa rolne mora biti zategnuta određenom silom, koja se meri mernim ćelijama postavljenim na jednom od nepogonskih valjaka između odmotrača i prese. Direktno merenje sile u traci omogućuje realizaciju regulacije sile zatezanja trake u zatvorenoj sprezi, upravljanjem pneumatskim kočnicama postavljenim na odmotraču. Na ovom delu poprečnog rezača između dva nepogonska valjka postavljen je mehanizam za ispravljanje trake koja se seče, tzv. lira. Pozicija mehanizma lire se meri apsolutnim enkoderom. Novim rešenjem upravljanja realizovana je funkcija pozicioniranja [4] mehanizma lire u funkciji prečnika rolne trake koja se seče (odmotava). Prečnik rolne koja se odmotava se meri ultrazvučnim sensorima (na svakom odmotraču po jedna). Na taj način se rukovaoci oslobađaju obaveze da podešavaju poziciju lire kako bi postigli optimalno ispravljanje trake.

Za realizaciju kontinuiranog procesa sečenja, bez zaustavljanja, nakon početnog ručnog provlačenja trake od rolne do prese, postavljen je mehanizam koji omogućuje automatski prelazak rada poprečnog rezača sa trakom sa odmotrača 1 na rad sa trakom sa odmotrača 2, i obrnuto, tzv. preveslavanje. Ovaj mehanizam čini niz nepogonskih valjaka postavljenih na tzv. kolica za preveslavanje. Upravljanjem pozicijama ovih valjaka stvaraju se uslovi za zamenu rolne sa koje se traka odmotava. Položaj kolica za preveslavanje se meri pomoću apsolutnog enkodera što omogućuje automatsko pozicioniranje iz sistema upravljanja. Za pokretanje kolica koristi se motorni pogon napajan iz frekventnog pretvarača. Raspored gore opisanih celina poprečnog rezača prikazan je na slici 1.

U daljem tehnološkom lancu rada poprečnog rezača pogon prese doprema traku koja se seče do letećih makaza (mehanizam koji seče traku) koje čine pogon noža. Leteće makaze se sastoje od dva noža postavljena upravno na

kretanje trake. Ovaj mehanizam obezbeđuje da se noževi nađu u istom trenutku jedan naspram drugog i izvrše odsecanje dela trake. Da bi se obezbedilo pravilno odsecanje sa visokim kvalitetom reza, obodna brzina noževa mora biti jednaka brzini trake u trenutku odsecanja. Isečeni komadi (tabaci) se pomoću transportne trake dopremaju do sekcije za slaganje na kojoj se tabaci slažu i poravnavaju formirajući krajnji proizvod poprečnog rezača, odnosno paletu sa tabacima.

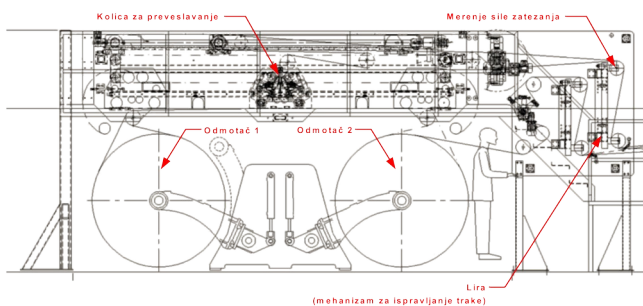
Na sekciji za slaganje nalaze se dva regulisana elektromotorna pogona, pogon za vertikalno kretanje palete sa tabacima (pogon lifta) i pogon za horizontalno pomeranje prazne palete (u fazi pripreme) ili palete sa isečenim komadima (u fazi odvoženja krajnjeg proizvoda na dalju obradu). Neposredno ispred transportne trake postavljen je mehanizam za odbacivanje neispravnih (oštećenih ili prljavih) odsečenih komada, tzv. zapornica kojim se upravlja ručno od strane rukovaoca ili automatski sistemom za kontrolu kvaliteta. Osnovu sistema kontrole kvaliteta čine kamere i softver za obradu slike u realnom vremenu. Ovaj sistem vrši stalni nadzor kvaliteta trake i po potrebi generiše signal koji prosleđuje upravljačkom sistemu poprečnog rezača za odbacivanje neispravnih komada.

Za potrebe povećanja efikasnosti rada poprečnog rezača u upravljačkom sistemu realizovane su dve opcije njegovog automatskog rada: 1 - rad po željenom broju isečenih komada, 2 - rad po željenoj visini palete sa isečenim komadima.

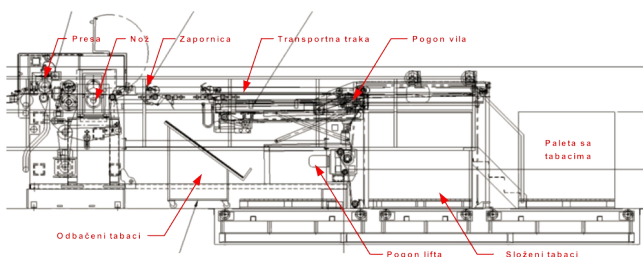
Na sekciji slaganja isečenih komada, pre postavljanja prazne palete na potrebnom položaju, postoji mehanizam za prihvat tabaka (zbog svog oblika nazvan „vile“). Na ovom mehanizmu praktično započinje proces slaganja isečenih komada za novu paletu. Mehanizam za prihvat pokreće regulisani elektromotorni pogon napajan iz frekventnog pretvarača.

Tokom procesa sečenja, osim poprečnog sečenja kartonske trake na tabake željene dužine vrši se i sečenje u uzdužnom pravcu kako bi se isekle ivice trake i formirali komadi (tabaci) potrebne dužine i širine.

Raspored opisanih celina poprečnog rezača u prethodnom delu teksta prikazan je na slici 2.



Sl. 1. Tehnološki delovi poprečnog rezača - odmotič ispravljanja trake

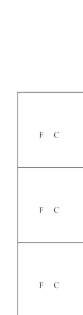


Sl. 2. Tehnološki delovi poprečnog rezača - sečenje trake i slaganje tabaka

II. OPIS SISTEMA UPRAVLJANJA

Sistem upravljanja poprečnog rezača mora da objedini sve napred opisane funkcionalne celine, koje potiču i od različitih proizvođača, u jedno integrisano postrojenje koje će obezbediti njihovo maksimalno iskorišćenje.

Na slici 3. prikazana je osnovna struktura realizovanog upravljačkog sistema.



Sl. 3. Blok dijagram upravljačkog sistema poprečnog rezača Valmet 14.5

Na poprečnom rezaču Valmet 14.5 u fabrici kartona „Umka“, sistem upravljanja je realizovan pomoću Technology PLC-a poslednje generacije sa integrisanim PROFInet i PROFIBUS komunikacijskim protokolima. Komunikacija između frekventnih pretvarača glavnih pogona (presa i nož) i PLC-a se obavlja korišćenjem PROFInet protokola, dok je komunikacija ostalih regulisanih pogona (ukupno 6) i PLC-a realizovana PROFIBUS protokolom. PROFIBUS komunikacija se koristi i za povezivanje PLC-a sa apsolutnim enkoderima, upotrebljenih za dobijanje informacije o položajima: 1) kolicima za promenu aktivnog odmotiča, 2) mehanizma za ispravljanje trake i 3) sekcije za slaganje. PROFInet protokol se koristi i za povezivanje ulaznih i izlaznih digitalnih i analognih signala preko modula grupisanih u šest celina.

Za napajanje glavnih pogona (presa i nož) koriste se frekventni pretvarači visokih performansi sa integrisanim algoritmom upravljanja servo pogona. Ostali regulisani

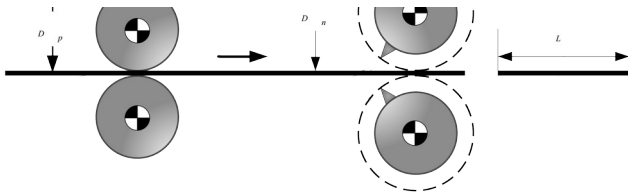
pogoni se napajaju iz frekventnih pretvarača [5] sa integrisanom PROFIBUS komunikacijom.

Značaj realizovanog sistema upravljanja nalazi se i u različitim opcijama za nadzor rada pogona i ostale opreme, što omogućuje brzo otkrivanje kvarova senzora i opreme, a samim tim i efikasno otklanjanje kvarova u kratkom roku.

III. GLAVNI POGONI POPREČNOG REZAČA

U praksi na postrojenjima poprečnih rezača se mogu naći dva rešenja pokretanja glavnih pogona - pogona prese i noža. Ova rešenja su u skladu sa raspoloživom tehnikom iz vremena kada su razvijani. Ranija rešenja su imala mehanizam za promenu brzine noža u okviru jednog kruga izlaznog vratila, uz održavanje približno konstantne ulazne brzine u mehanizam (konstantna brzina motora). Često korišćen naziv za ovaj mehanizam sa ekscentrom je "krivajni mehanizam" [6]. Sa razvojem digitalne tehnike upravljanja elektromotornim pogonima, kao i energetske elektronike, postalo je moguće menjati brzinu motora koji pokreće valjke noževa, sa adekvatnom dinamikom promene brzine, bez upotrebe krivajnog mehanizma. Ovo rešenje je primenjeno na poprečnom rezaču koji je tema ovog rada.

Na slici 4. prikazan je princip rada glavnih pogona poprečnog rezača.



Sl. 4. Princip rada glavnih pogona poprečnog rezača

Traka koja se seče dolazi do letećih makaza linijskom brzinom (v_T), koja je određena brzinom obrtanja pogonskih motora prese (ω_p) i obima vučnih valjaka ($\pi \cdot D_p$). Mehanizam letećih makaza čine dva noža postavljena upravno na kretanje trake, dužina sečiva noževa odgovara maksimalnoj širini trake koja se seče.

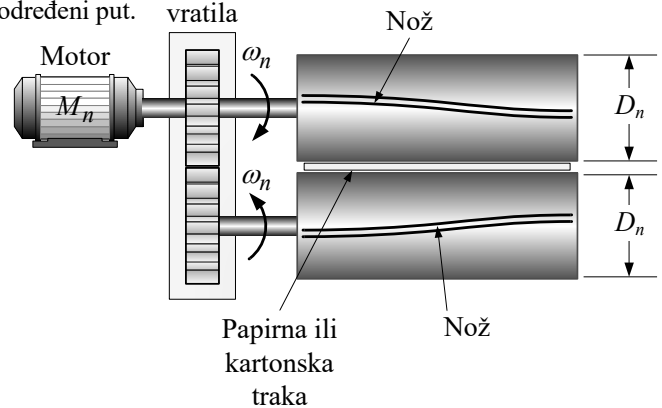
Da bi se obezbedilo pravilno odsecanje, obodna brzina noževa mora da bude jednaka brzini trake u trenutku sečenja. Dobar kvalitet sečenja se jedino može postići ako je brzina približno konstantna u kratkom vremenskom periodu pre i posle odsecanja komada kartonske trake. Vremenski profil trenutne vrednosti obodne i ugaone brzine noževa između dva odsecanja određena je odnosom dužine komada (L) koji se seče i obima noža ($\pi \cdot D_n$), što je njegova konstruktivna karakteristika.

IV. OPIS SISTEMA UPRAVLJANJA LETEĆIH MAKAZA NA POPREČNOM REZAČU VALMET 14.5

Mehanizam letećih makaza na poprečnom rezaču koji je tema ovog rada spada u kategoriju mehanizama sa promenljivom brzinom pogonskog motora. Takav pogon zahteva složenije upravljanje, ali i odgovarajuće karakteristike pogona. Sa jedne strane pretvarač mora da omogući precizno upravljanje momentom motora sa velikom brzinom odziva, sa druge strane sama konstrukcija

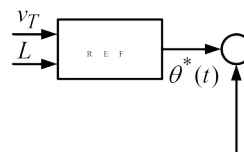
mehanizma mora biti sa što manjom ukupnom inercijom. Zbog toga je konstrukcija letećih makaza takva da se odsecanje vrši pri svakom prolazu, a korišćeni bubnjevi na koje su postavljeni noževi su sa minimalnim momentom inercije. Takođe, zbog velikih vrednosti dinamičkih momenata motora, primenjeno je rešenje sa direktnim sprezanjem motora sa bubnjevima sa noževima, bez korišćenja reduktora.

Na slici 5. prikazana je dispozicija mašinskog dela mehanizma letećih makaza sa promenljivom brzinom pogonskog motora i direktnim pokretanjem makaza, bez reduktora. Interesantno je uočiti postojanje odstupanja oblika noževa od prave linije. Ovo je posledica neophodnosti prilagođenja oblika noževa procesu sečenja koji ima konačno vreme trajanja, sprejku koga traka koja se seče prelazi određeni put. vratila



Sl. 5. Dispozicija mašinskih komponenti mehanizma letećih makaza poprečnog rezača sa promenljivom brzinom pogona

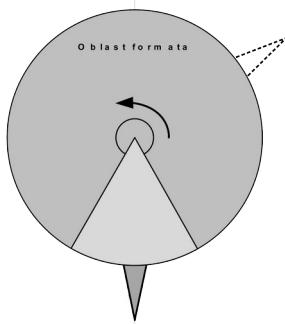
Upravljačka struktura realizovanog pogona letećih makaza ima regulator pozicije kao nadređeni regulator, kao i regulator brzine i momenta [7]. Za generisanja referentne vrednosti pozicije noževa korišćena je namenska aplikacija razvijena za ovu vrstu pogona koja se izvršava u primenjenom Technolgy PLC-u. Struktura upravljačkog dela pogona makaza prikazana je na slici 6. Komanda momenta se obrađuje u upravljačkom delu invertora i skalira u q-komponentu struje vektorski upravljanog asinhronog motora.



Sl. 6. Struktura upravljačkog dela pogona letećih makaza

Na osnovu datih objašnjenja o načinu rada letećih makaza, jasno je da se vremenska zavisnost referentne pozicije ($\theta^*(t)$) menja ciklično, sa periodom koja je jednaka vremenu između dva odsecanja (T). Vreme između odsecanja izračunava se prema zadatoj dužini tabaka i brzine trake, koja je promenljiva u toku rada. Vreme između odsecanja je isto vreme potrebno da bubnjevi na koje su postavljeni noževi opišu pun krug. Na slici 6. blok "REF" predstavlja blok za generisanje referentne pozicije.

Na slici 7. prikazana je geometrija noža sa promenljivom brzinom pogona a način generisanja referentne pozicije noža je opisan u nastavku.

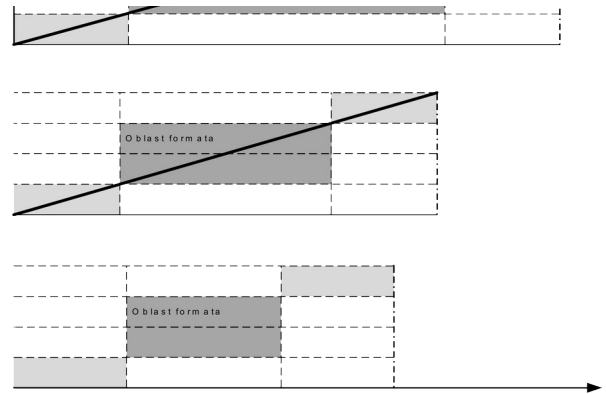


Sl. 7. Geometrija noža sa promenljivom brzinom motora

Iz prikazane geometrije na slici 7, mogu se uočiti dve oblasti trajektorije vrha noža, odnosno dva dela perioda između dva odsecanja. Prva je oblast sinhronizacije u kojoj je obodna brzina noža jednaka brzini trake. Druga je oblast formata u kojoj je brzina obrtanja motora promenljiva i zavisi od odnosa dužina komada i obima noža [8].

Na slici 8. prikazana je grafička zavisnost referentne pozicije noža (ugao noža) u periodu između dva odsecanja za tri različita slučaja određena odnosima dužina komada koji se seku i obima noža. Na gornjem dijagramu prikazana je zavisnost za rad poprečnog rezača kada je potrebna dužina komada (formata) koji se seku (L_2) veća od tzv. kritične dužine (L_k) koja je jednaka obimu noža, ($L_2 > L_k$). Sa dijagrama se može uočiti da se ugao ne menja na sredini formata (nož stoji), u okolini 180° . Srednji dijagram predstavlja zavisnost promene referentnog ugla za formate jednake obimu noža, ($L = L_k$), kada je promena ugla konstantna, što znači da je brzina noža konstantna. Na donjem dijagramu prikazana je zavisnost referentnog ugla noža za rad poprečnog rezača sa formatima (L_1) manjim od tzv. kritične dužine (L_k), ($L_1 < L_k$). Tada je promena ugla veća u oblasti formata, odnosno nož ubrzava u odnosu na traku. U sva tri slučaja u oblasti sinhronizacije promena ugla je konstantna, odnosno brzina noževa je sinhronizovana sa konstantnom brzinom trake.

U opsegu željenih formata sečenja manjim od kritičnog, promenu brzine treba postići za kraće vreme ciklusa, što dovodi do velikih vrednosti momenata potrebnih za takvu promenu brzine. Da bi se zadržale vrednosti momenta ispod maksimalno dozvoljene vrednosti momenta motora (dvostruka nominalna vrednost) pribegava se produženju ciklusa sečenja, odnosno, na formatima manjim od kritičnog, ograničava se brzina kretanja materijala (trake) u funkciji zadatog formata sečenja.

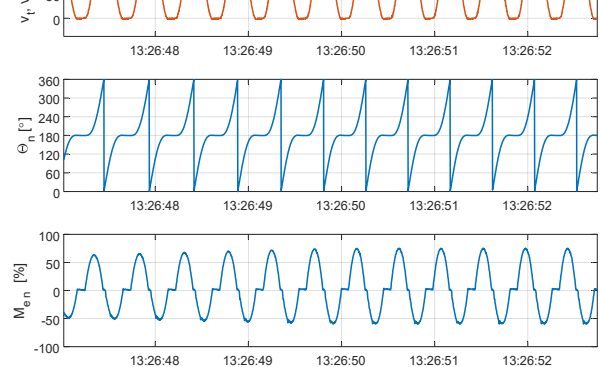


Sl. 8. Grafički prikaz priraštaja referentne pozicije u periodu između dva odsecanja

V. OSTVARENI REZULTATI

Tokom podešavanja parametara, ispitivanja i puštanja u rad elektromotornih pogona sa novim frekventnim pretvaračima, sinhronizacija brzine i pozicije pogona noža i prese implementirana je u „Technology“ PLC-u, sa brzim izvršavanjem i razmenom informacija sa pretvaračima [9]. Ostvaren je period rada algoritma od 1 (ms), što zadovoljava potrebe postrojenja za zahtevanu tačnost sečenja pri maksimalnoj brzini od 300 (m/min), odnosno najkraćem ciklusu sečenja od samo 200 (ms).

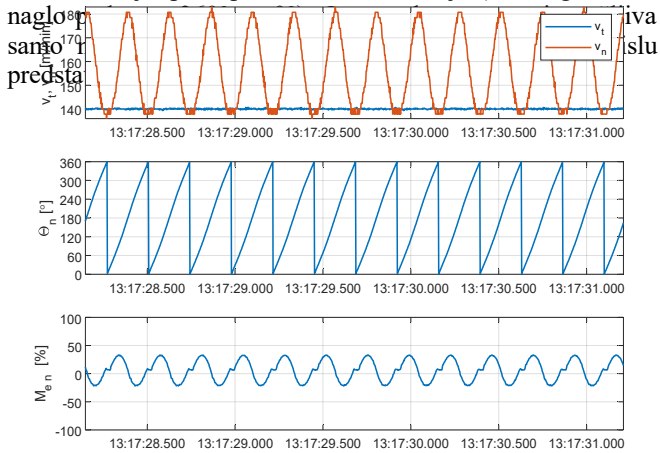
Slika 9. prikazuje rad pogona noža poprečnog rezača pri zadatom formatu $L=1400$ (mm). Dve krive na gornjem vremenskom dijagramu su linijske brzine trake i noža. Poklapanje kriva ukazuje na sinhronizaciju brzina.



Sl. 9. Snimljeni vremenski dijagrami pogona noža pri zadatom formatu $L=1400$ (mm)

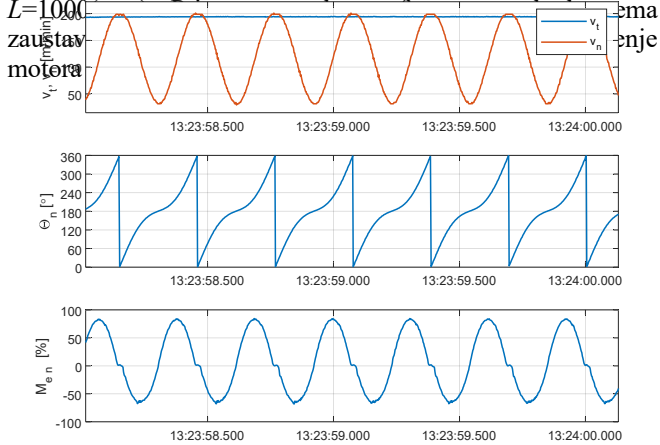
Vremenski dijagram u sredini prikazuje promenu ugla pogona noža za zadati format. Uočljiv je visok stepen sličnosti talasnog oblika sa prikazanom krivom na gornjem delu slike 8. Donji vremenski dijagram prikazuje moment motora noža, sa izraženom dinamičkom komponentom u oblasti formata, ali i dva karakteristična perioda nepromenljivog momenta, kada motor noža stoji u gornjem položaju, i kada motor ide konstantnom brzinom u oblasti sinhronizacije.

Vremenski dijagram istih veličina iz pogona prese i noža snimljen na poprečnom rezaču pri radu sa zadatim formatima $L=550(\text{mm})$ prikazan je na slici 10. Promena ugla u vremenu za format manji od osnovnog formata (L_k) pokazuje visoku sličnost sa krivom prikazanom na donjem delu slike 8. Na ovom formatu nema zaustavljanja pogona noža, štaviše, pogon noža u gornjem položaju ima najveću brzinu, ali se može uočiti period rada sa konstantnom brzinom u oblasti sinhronizacije, pre i posle trenutka sečenja (kada ugao noža



Sl. 10. Snimljeni vremenski dijagrami pogona noža pri zadatom formatu $L=550(\text{mm})$

Na vremenskom dijagramu prikazanom na slici 11., prikazan je rad pogona noža pri zadatom formatu $L=1000(\text{mm})$. Na ovom formatu nema zaustavljanja pogona noža, štaviše, pogon noža u gornjem položaju ima najveću brzinu, ali se može uočiti period rada sa konstantnom brzinom u oblasti sinhronizacije, pre i posle trenutka sečenja (kada ugao noža



Sl. 11. Snimljeni vremenski dijagrami pogona noža pri zadatom formatu $L=1000(\text{mm})$

ZAKLJUČAK

Projektovani i implementirani sistem upravljanja poprečnim rezačem pokazao je potpunu adekvatnost u odnosu na visok stepen složenosti procesa. Njegova funkcionalna i strukturna rešenja u potpunosti korespondiraju sa savremenim tendencijama i tehnološkim dostignućima u ovoj oblasti na globalnom nivou, čime se potvrđuje usklađenost sa aktuelnim međunarodnim praksama i standardima.

Ostvareni rezultati nakon primene novog rešenja sistema upravljanja na poprečnom rezaču pokazali su da je sistem uspešno objedinio sve potrebne funkcije uz upotrebu hardverskih i softverskih proizvoda koja su trenutno dostupna i tokom budućeg životnog veka poprečnog rezača. U periodu nakon ugradnje poprečni rezač je radio praktično bez ikakvih kvarova i zastoja.

Dokazano je da se zahtevana visoka tačnost dužine sečenja može ostvariti primenom regulisanih pogona sa asinhronim motorima, koji se napajaju iz frekventnih pretvarača, a to znači bez potrebe za korišćenjem specijalizovanih regulatora i zasebnih upravljačkih celina.

Implementacijom novog sistema upravljanja pojedine tehnološke funkcije poprečnog rezača su unapređene, kao što je funkcija regulacije sile zatezanja kartona, funkcija automatskog upravljanja sistemom za ispravljanje trake (lirom), funkcija automatskog rada poprečnog rezača po željenom broju tabaka i željenoj visini palete. Ove funkcije su olakšale rad rukovaocima, smanjile mogućnost ljudske greške i tako povećale vremensko iskorišćenje postrojenja.

REFERENCE

- [1] M. Bebić, N. Rašić, D. Stanić, S. Đurić, M. Stanković i S. Dobrić, "modernizacija elektromotornih pogona i upravljačkog sistem poprečnog rezača valmet 14.5 u Fabriki kartona Umka," XXVI međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, 23-24 jun 2025.
- [2] C. Qiong, i L. Yuanjun, "Design of paper cutter machine," Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 9th International Conference, pp. 504–508, 2008.
- [3] M. Belinčević, M. Bebić, i B. Jeftenić, "Upravljački algoritam za sinhronizaciju rada pogona letećih makaza," XI Simpozijum Energetske Elektronika, Novi Sad, 2001.
- [4] D. Hansen, J. Holtz i R. Kennel, "Close contact [cross cutters, knives], "Industry Applications Magazine, IEEE vol. 9, pp. 33–39, 2003.
- [5] Danfoss, FC-302 manuals collection [Online], available: <https://www.danfoss.com/en/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-automationdrive-fc-301-fc-302/>
- [6] B. Jefteni, M. Bebić, S. Štatkic Višemotorni električni pogoni. Akademiska Misao, Beograd, 2011.
- [7] W. Leonhard, "Control of electrical drives," Springer, 2001.
- [8] Siemens Industry Online Support: "SIMATIC S7-1500 -All about Motion Control", V1.1, 03/2022, Entry ID: 109803969, <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/109803969>
- [9] Siemens Industry Online Support: "SIMATIC S7-1500T Rotary Knife", V1.4, 06/2023, Entry-ID: 109757260, <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/109757260>