

Rekonstrukcija elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5D u sistemu dopreme uglja na termoelektrani „Nikola Tesla-B“

Reconstruction of the electric motor drive of the T5L and T5P conveyor belts in the coal delivery system at the thermal power plant „Nikola Tesla-B“

Željko V. Despotović*, Aleksandar I. Ribić*, Dejan Đokić**, Ranko Rakijaš**

* Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu

** Institut "Mihajlo Pupin"-Projekt Inženjering, Beograd

Apstrakt - U sklopu rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5D u sistemu za dopremu uglja na termoelektrani „Nikola Tesla“-B su izvršena opsežna merenja na postojećem sistemu neregulisanog elektromotornog pogona, baziranog na hidro-dinamičkoj spojnici. Na osnovu ovih merenja sagledani su svi nedostaci postojećeg rešenja u električnom i mehaničkom smislu, urađen je kompletan simulacioni model sistema, na osnovu čega je predloženo novo rešenje regulisanog elektromotornog pogona baziranog na DTC and frekventnoj regulaciji uz mogućnost kombinacije čoperskog kontrolisanog kočenja i mehaničkog kočenja pogona. U radu su predstavljeni ključni rezultati merenja na postojećem sistemu, njihova analiza i predlog inoviranog rešenja.

Ključne Reči- Doprema uglja, transportne trake, elektromotorni pogon, DTC, frekventna regulacija, čopersko kočenje

Abstract - U sklopu rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5P u sistemu za dopremu uglja na termoelektrani „Nikola Tesla“-B su izvršena opsežna merenja na postojećem sistemu neregulisanog elektromotornog pogona, baziranog na hidrodinamičkoj spojnici. Na osnovu ovih merenja sagledani su svi nedostaci postojećeg rešenja u električnom i mehaničkom smislu, urađen je kompletan simulacioni model sistema, na osnovu čega je predloženo novo rešenje regulisanog elektromotornog pogona baziranog na DTC frekventnoj regulaciji uz mogućnost kombinacije čoperskog kontrolisanog kočenja i mehaničkog kočenja pogona. U radu su predstavljeni ključni rezultati merenja na postojećem sistemu, njihova analiza i predlog inoviranog rešenja.

Key words: transportne trake, regulisani pogon, čopersko kočenje, mehaničko kočenje, dtc frekventna regulacija

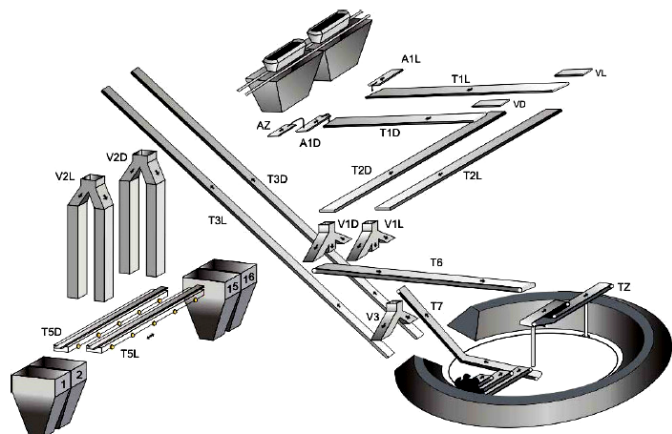
I. UVOD

U termoelektrani „Nikola Tesla-B“ (TENT-B), ugalj se dovozi vozovima iz kolubarskog basena. Ugalj se iz vagona istovaruje u bunkere i trakastim transporterima odvodi u kotlovske bunkere bloka B1 i B2 ili odlaže na deponiju uglja. Sistem transportera koji povezuje različite tačke postrojenja sastoji se dve odvojene linije od kojih svaka sposobna da obezbedi kapacitet od 2300t/h. Obzirom da potrošnja kotla jednog bloka iznosi oko 920t/h uglja dovoljna je samo jedna linija transportera za snabdevanje dva bloka termoelektrane, dok druga linija predstavlja rezervu za nesmetan rad termoelektrane[1-3].

Kao što prikazuje Slika 1, kolica sa trakom T5 za dopremu uglja su poslednja karika u transportu uglja do bunkera. U bunkerima se inače skladišti oko 600t uglja. Sistem radi tako što indikatori količine uglja u bunkerima šalju signal ka upravljačkom sistemu, da je potrebno dopuniti bunkere ugljem. Tada se određenim redosledom uključuju jedna po jedna transportna traka. Ugalj se doprema ili sa skladišta uglja preko kopača, ili neposredno sa presipne stanice iz vagona sa ugljem.

Kada se želi promena smera trake T5, prvo se zaustavi izvor punjenja te trase, potom se sačeka da se istovari sva količina koja je u tom momentu na trasi, a zatim se izvrši promena smera. Po izvršenoj promeni smera, ponovo se uključuje izvorna traka koja unosi nove količine uglja. Radi obezbeđenja pouzdanosti transporta uglja nad bunkerima, ugalj se nasipa nezavisno pomoću dvojica kolica. U slučaju da dođe do kvara tokom rada

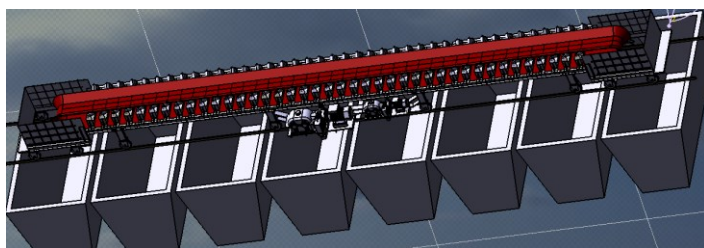
jednih kolica, druga kolica se uključuju i nastavljaju praktično besprekidno nasipanje uglja, odnosno punjenja bunkera ugljem[1].



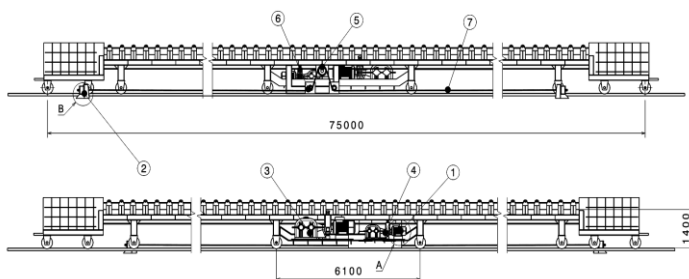
Slika 1- Principijski prikaz transporta uglja sa deponije do bunkera na TENT-B[1].

Kolica se sastoje od rešetkaste konstrukcije, koja se preko više parova šinskih točkova oslanja na dve šine. Šine su oslonjene na gornje ivice bunkera (Slika 2). Na kolicima je postavljena pokretna gumena transportna traka, koja se pokreće preko reduktora, hidrodinamičke spojnice i elektromotora. Osnovni tehnički podaci za traku i kolica su: kapacitet trake $Q=2700-3200t/h$, brzina trake $4.3m/s$, brzina kolica $0.4m/s$, dužina kolica $75m$.

Zavisno od potrebe rukovalac može jednostavno promeniti smer kretanja trake, prema ispražnjenosti bunkera. Na kolicima se, prema prikazu na Slici 3 između ostalog, nalazi pogonski elektromotor (1), koji preko hidrodinamičke spojnice (4), reduktora(3), pogonskog lančanika (5) i lanaca (7) pokreće kolica duž šina, u jednu ili drugu stranu, već prema potrebi rukovalaca. Lanac je na oba kraja posredstvom pogonskog i pomoćnog lančanika (6) vezan elastičnim oprugama (2).



Slika 2-Uprošćeni 3D prikaz trake T5L sa kolicima i prihvatnih bunkera na kotlu



Slika 3- Mehanički sklop kolica trake T5L

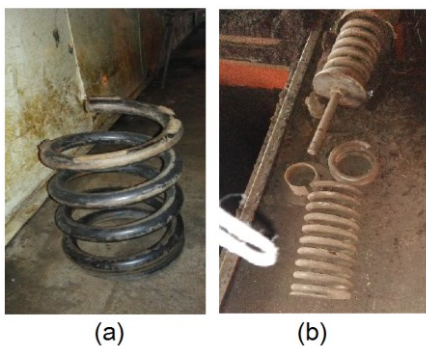
II. PROBLEMI U RADU POSTOJEĆEG POGONA KOLICA

Tokom dužeg eksploatacionog rada pojavili su se određeni problemi u postojećem elektromotornom pogonu kolica. Na ovom mestu će biti naznačeni neki najbitniji uzroci ovih problema:

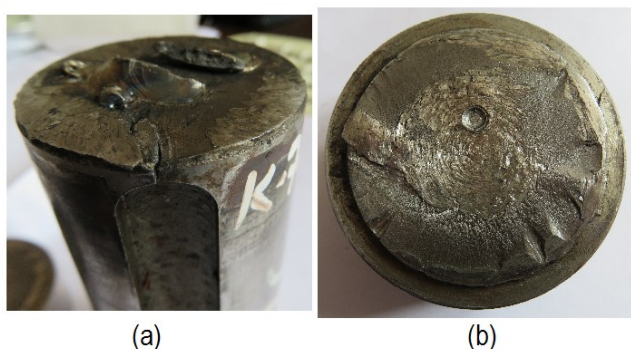
- veliko zaprljanje, isparenja, abrazivna sredina
- velika ulegnuća na šinama kojima se kreću kolica
- intermitentni rad pogona – veliki broj uključivanja, minimum 30-40 u toku sata
- kratak rad, koji traje po par sekundi
- između dva starta vreme može biti desetak sekundi
- problemi u pozicioniranju i kočenju kolica

Kao posledica prethodno pomenutih uzroka na pogonu kolica se pojavilo niz problema. U nastavku će biti navedeni oni ključni. Tokom rada kolica na dopremi uglja primećeno je otežano upravljanje i precizno pozicioniranje u određenim položajima na šinama. Ovo se dešavalo prilikom dejstva inercijalnih sila usled pokretanja transportne trake na kolicima, ili usled promene smera njenog kretanja. U tom cilju, potrebno je bilo osposobiti kočnicu na pogonskom reduktoru kolica, kako bi kolica potpuno mirovala u pomenutim situacijama. Dodatni problem što se pouzdanog rada kočnice tiče, se odnosio na veliku koncentracije ugljene prašine i vlage u okruženju. Iz ovog razloga je kočenje bilo neefikasno i nepouzđano. Takođe jedan od problema koji se često javljao je spadanje lanca sa pogonskog zupčanika. Ovi problemi su veoma često bili uzrok tzv. "katapultiranja" kolica i njihovog udaranja u granične odbojnice. Na ovaj način značajno se, u mehaničkom smislu, narušavala kompletna konstrukcija kolica. Primećeno je takođe, da zavisno od opterećenja i ulegnuća na šinama, je nekad teže pokrenuti kolica. Na osnovu ovoga se dešavalo prepunjavanje bunkera, a nekad se usled dejstva elastične sile u oprugama na krajevima pogonskog lanca dešavalo da kolica, zbog veće primljene kinetičke energije pređu željeni položaj pa počinju da pune dva bunkera istovremeno, i to preko pregrade koja ih razdvaja. Na ovaj način je bilo otežano pravilno punjenje bunkera. Kao negativne posledice ovoga dolazilo je do:

- pucanja pogonskog lanca
- katapultiranja kolica
- ispadanje kolica iz ležišta
- kidanja napojnog kabla
- pucanja cilindričnih opruga (Slika 4)
- pucanja osovine motora (Slika 5)



Slika 4-Prikaz destrukcije opruga kolica; (a) izgled uništene opruge, (b) izgled opruge pre ugradnje gumenih odbojnika



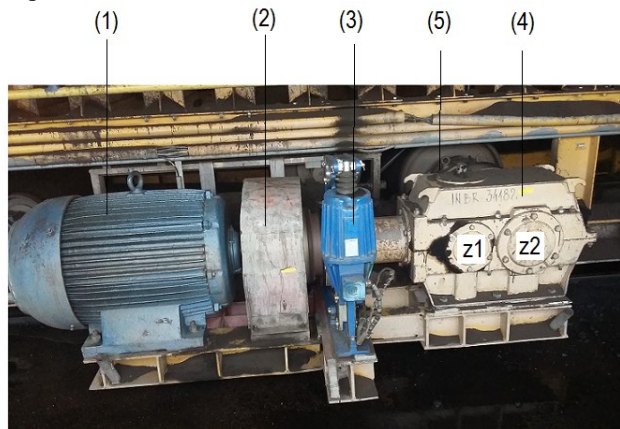
Slika 5-Prikaz loma vratila; (a) izgled uništenog vratila, (b) izgled uništenog vratila po preseku

Konstrukcija vođenja opruge je u zatvorenoj čauri, tako da pri olabavljenom lancu (što je bio čest slučaj tokom eksploatacije), dolazi do većih oscilacija kolica, a samim tim do nabijanja navojka na navojak i pucanja prva dva navojka (Slika 4), što još više dovodi do opuštanja lanaca, tako da opruga gubi funkciju. Sa druge strane ima se veće oscilovanje kolica, i ovo oscilovanje se prenosi preko reduktora hidrodinamičke spojnice na pogonski elektromotor, gde se na prelazu klina ima opasan presek i pucanje vratila $\varnothing 42$, $\varnothing 48$, pa čak i $\varnothing 80$, usled dominantne pojave zamora materijala, kao što prikazuje Slika 5.

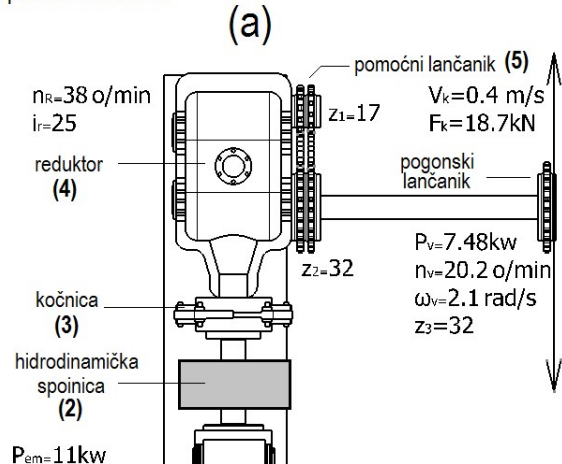
III. MERENJA NA POSTOJEĆEM POGONSKOM SISTEMU KOLICA

Zbog brojnih problema na postojećem pogonskom sistemu kolica trake T5L na dopremi uglja, njihovom rešavanju se pristupilo sistematično i izvršene su brojne analize i proračuni u cilju njihovog prevazilaženja. Za konačan predlog regulisanog elektromotornog pogona kolica od veoma bitnog značaja su bila merenja veličina od interesa: napon i struja pogonskog motora kolica, kao i hodovi zavojnih opruga posredstvom kojih se obezbeđuje zatezanje lanca. Prikaz neregulisanog pogona kolica je da na Slici 6. Na Slici 6(a) je data dispozicija pogona u realnim eksploatacionim uslovima, dok je na Slici 6(b) dat principski prikaz sa relevantnim tehničkim detaljima (brojne vrednosti karakterističnih električnih i mehaničkih veličina). Na Slici 7 dat simulacioni model neregulisanog pogona kolica kao i principska blok šema mernog sistema (merni elementi-davači i senzori, kao

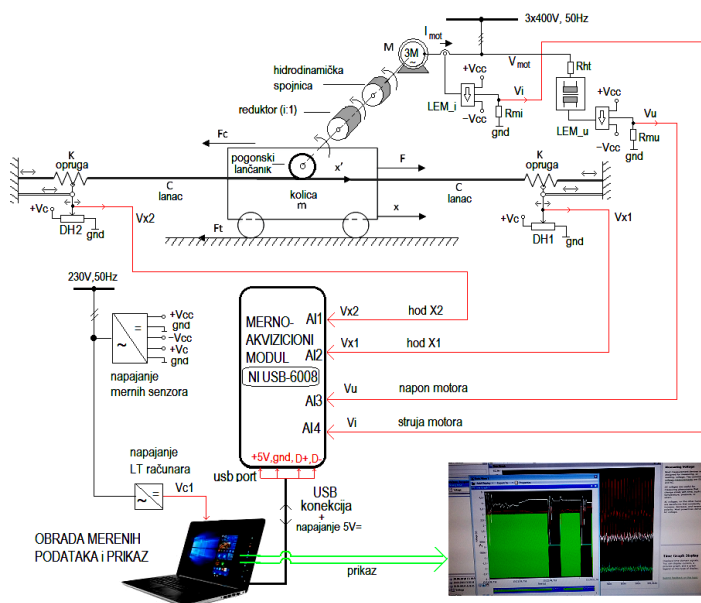
i merno-akvizicioni sistem), koji su realizovani u realnim eksploatacionim uslovima.



(1) pogonski elektromotor, (2) HD spojnica, (3) kočnica, (4) reduktor (5) pomoćni lančanik



Slika 6- Neregulirani elektromotorni pogon kolica na dopremi uglja TENT-B; (a) dispozicija u realnom okruženju, (b) principski prikaz neregulisanog elektromotornog pogona kolica



Slika 7- Principalska blok šema merno-akvizicionog sistema elektromotornog pogona kolica

Prema Slici 7, kolica mase m pogonjena su motorom M preko hidrodinamičke spojnice, reduktora, pogonskog lančanika i lanca C . Lanac C je na svoja oba kraja fiksiran zavojnim elastičnim oprugama za nepokretnu podlogu. Relativni položaj kolica u odnosu na lanac označen je sa x' , a stvarni položaj kolica u odnosu na nepokretnu podlogu sa x . Sila F kojom lanac gura kolica u idealnom slučaju, se može prikazati relacijom:

$$F = 2k \cdot (x' - x) \quad (1)$$

Zategnutost lanca u sklopu postojećeg pogona kolica je bila jako loša, tako da je pretpostavljeno da postoji tzv. "mrtva zona" širine Δx , tako da je:

$$|x' - x| \leq \Delta x \Rightarrow F = 0 \quad (2)$$

Na kolica takođe deluju sila trenja F_t i sila F_c . Sila F_c je posledica dejstva trake za transport uglja na kolica. Proračunom je dobijeno da je masa kolica $m \approx 70t$, a da je krutost opruge $k = 150N/mm$. Brzina kolica je određena zahtevima transporta i dopreme uglja i u stacionarnom stanju ona iznosi oko $40cm/s$. Nominalna sila motora koja se prenosi na lanac bez gubitaka u spojnici, reduktoru i lančaniku za snagu motora od $11kW$, iznosi $F_n = 11/0.4 \approx 27.5kN$, a startna sila za ubrzanje kolica jednaka je dvostruko vrednosti nominalne. Proračunati stepen iskorišćenja iznosi $\eta = 0.7$, tako da je stvarna sila koja se deluje pri startu kolica jednaka $F = 2F_n \cdot 0.7 \approx 38.5kN$.

U cilju obavljanja merenja na elektromotornom pogonu kolica na transportnoj traci T5L, realizovana je u sklopu ovog sistema merno-akviziciona stanica. Blok šema merno-akvizicionog sistema je prikazana na Slici 7.

Za merenje hodova opruga su korišćeni linearni potencijometri davači hoda DH1, DH2 sa naponskim izlazima V_{X1} , V_{X2} , respektivno. Korišćeni su linearni potencijometri davači hoda i to DH1: HLP/9dSA1/200/8k proizvodnje Penny&Giles, opsega hoda $0 \div 200mm$, opseg otpora $0 \div 8k\Omega$, linearnosti $\leq 0.3\%$. i DH2: isti proizvođač, ali za opseg hoda $0 \div 7=6mm$, opseg otpora $0 \div 3k\Omega$, linearnosti $\leq 0.4\%$. Napajanje linearnih davača hoda je iznosilo $V_c = +5V$.

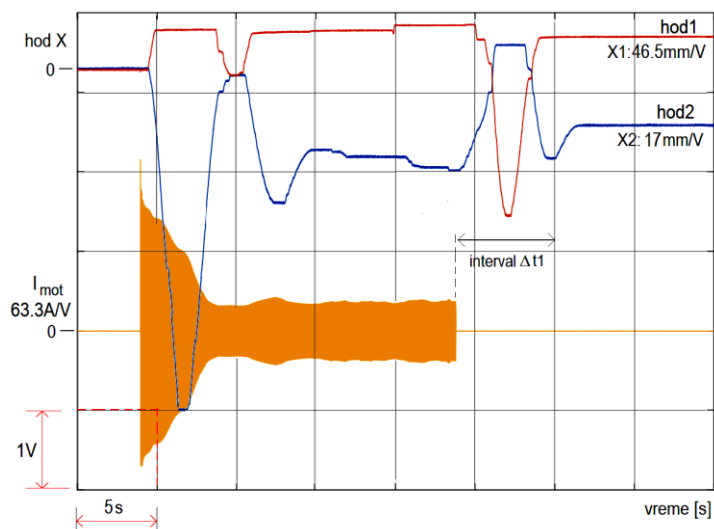
Za merenje električnih veličina su korišćeni strujni LEM_i i naponski LEM_u , senzori sa feritnim torusnim jezgrima sa ugrađenim Holovim elementima u procepu torusa. Senzori su sa povratnom spregom, čime je obezbeđena kompenzacija primarno merene veličine i rad oko nulte vrednosti B-H krive magnetnog kola torusa.

Senzor struje LEM_i je industrijski, za ekstremne uslove ugradnje (vlaga, prašina, temperaturni opseg $0 \dots +70^\circ C$), proizvodnje LEM, tip LTA200-S/SP2, opsega $0 \dots \pm 300A$, prenosnog odnosa $1:2000$, propusnog opsega DC...100kHz i tačnosti $\leq 0.8\%$. Otpornik R_{mi} je tako proračunat da je za napon napajanja $V_{cc} = \pm 15V$, prenosna karakteristika ovog davača linearna i sa mernim pojačanjem $63.3A/V$.

Senzor napona LEM_u je takođe industrijski, proizvodnje LEM, tip LV100/SP58, opsega $0 \dots \pm 1500V$, prenosnog odnosa $1000:1000$, propusnog opsega DC...100kHz i tačnosti $\leq 0.7\%$. Otpornik prema priključcima na pogonskom elektromotoru dimenzionisan za maksimalni napon $600V$ i njegova vrednost je iznosila $R_{ht} = 39k\Omega/4W$. Merni otpornik R_{mu} je tako proračunat da je za napon napajanja $V_{cc} = \pm 15V$, prenosna karakteristika naponskog LEM davača linearna i sa mernim pojačanjem $177.6V/V$.

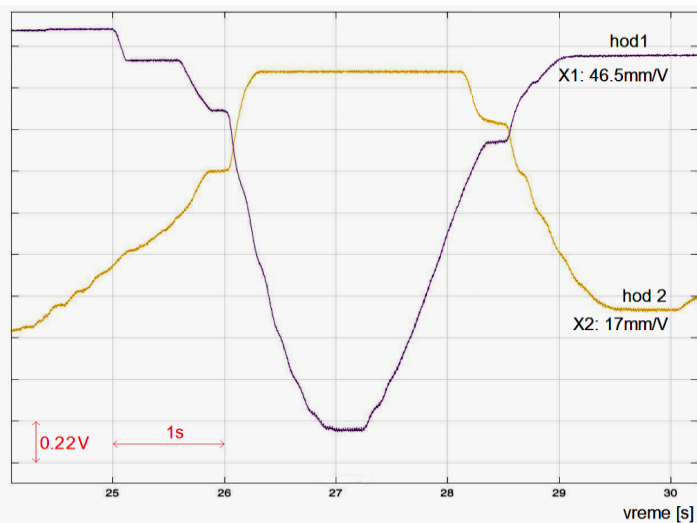
Za akviziciju podataka korišćen je merno-akvizicioni modul NIUSB 6008/6009 National Instrument [4], sa USB portom za povezivanje sa LAPTOP računarom na kojem je vršena obrada i prikaz izmerenih podataka. Sva četiri analogna ulaza ovog modula AI1 ÷ AI4 su referisani prema zajedničkoj masi. Na ove ulaze se dovode naponski signali sa senzora struje i napona V_i i V_u , kao i naponski signali sa linearnih davača hoda V_{X1} , V_{X2} , kao što je prikazano na Slici 7. Na Slici 8 prikazani su snimljeni realni hodovi opruga i struja motora pri startu i zaustavljanju (uključujući kočnje) pogonskog elektromotora.

Prilikom zaustavljanja kolica, a odmah nakon isključenja pogonskog elektromotora, aktivira se kočnica na vratilu reduktora (videti Sliku 6), tako opruge preuzimaju silu kočenja, i nakon nekoliko oscilacija dolazi do zaustavljanja kolica. Kašnjenje aktivacije i deaktivacije kočnice, kao što se vidi sa snimaka na Slici 8 je oko $0.3s$. Ove oscilacije su još više izražene u startu, pošto sila trenja ne menja smer pa je tako smanjeno prigušenje. Prigušenje u ovom slučaju je uslovljeno jedino karakteristikama pogonskog elektromotora. Pomenuta mrtva zona lanca Δx , data jednačinom (2), je na osnovu eksperimentalnih rezultata sa Slike 8, procenjena na oko $10 \div 15cm$. Procena je dobijena na osnovu kašnjenja u pomeranju opruge u odnosu na uključivanje pogonskog elektromotora.



Slika 8- Snimljena signali hodova opruga (hod 1-X1, hod 2-X2) i struja pogonskog elektromotora I_{mot}

Na Slici 9 je dat detaljniji prikaz merenih veličina hodova u intervalu Δt_1 , nakon isključenja glavnog pogonskog elektromotora.



Slika 9- Detaljni snimak hodova opruga u intervalu Δt_1 , nakon isključenja pogonskog elektromotora; hod 1-X1, hod 2-X2

Pomenuto rešenje elektromotornog pogona kolica često je dovelo do spadanja lanca ili njegovog pucanja, što je rezultovalo nekontrolisanom zaletanju kolica (tzv. "katapultiranju"), obzirom da na njih deluje sila F_c prouzrokovana od strane traka transportera, i dodatno udaranjem u odbojnice. Prilikom zaustavljanja kolica aktiviranjem kočnice dolazi do oscilovanja kolica napred-nazad. Ako zanemarimo prigušenje, tada je maksimalni hod opruge L_0 za nezategnuti lanac (aktivna je uvek samo jedna opruga), dat obrascem:

$$L_0 = v \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3)$$

dok je za zategnuti lanac:

$$L'_0 = v \cdot \sqrt{\frac{m}{2k'}} \quad (4)$$

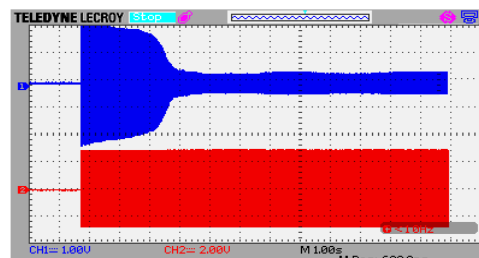
Dominantni uticaj na prigušenje oscilacija ima upravo trenje točkova kolica. Pri analizi problema sila trenja je modelovana suvim trenjem:

$$F_t = F_0 \cdot \text{sign}(v) \quad (5)$$

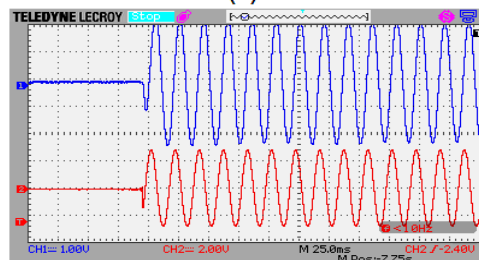
Proračunata vrednost za F_0 iznosi oko 13kN. Ukupan pređeni put (napred-nazad) L prilikom smirenja može se izračunati iz kinetičke energije kolica i energije trenja:

$$\frac{mv^2}{2} = L \cdot F_t \quad (6)$$

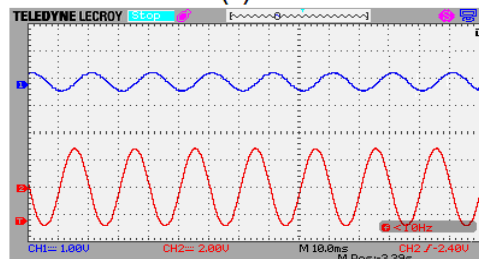
Za masu kolica $m=70000\text{kg}$ i brzinu kolica $v=40\text{cm/s}$, dobija se da je kinetička energija $E_k=5.6\text{kJ}$, odnosno i za silu $F_t=13\text{kN}$, dobija se da je pređeni put prilikom smirenja jednak $L = E_k / F_t = 0.43\text{m}=43\text{cm}$. Na Slici 10 su prikazani linijski napon i linijska struja pogonskog elektromotora u režimu polaska i u ustaljenom režimu. Dobijeni talasni oblici odgovaraju talasnom obliku struje koji je prikazan na Slici 8.



(a)



(b)



(c)

Slika 11- Snimci struje (CH1) i napona (CH2) pogonskog elektromotora; (a) pri startu i nakon prelaska u ustaljeni režim; (b) detaljan prikaz starta, (c) detaljan prikaz ustaljenog režima; $C_i=63.3\text{A/V}$, $C_u=177.6\text{V/V}$

Na Slici 11 su dati snimljeni talasni oblici karakterističnih električnih veličina (struje i napona) za razne režime rada, pogonskog elektromotora kolica.

Na Slici 11(a) je prikazan snimak struje pogonskog elektromotora kolica. Na ovom snimku se uočava da se start pogona ostvaruje u intervalu od 3s i da je polazna struja (CH1) iznosila oko 126.6A, što predstavlja približno šestostruku vrednost nominalne struje pogonskog elektromotora čija je snaga iznosila 11kW.

Efektivna vrednost linijskog napona motora u ovom intervalu je iznosila 360V_{eff}. Detaljan prikaz struje i napona pri startu pogonskog elektromotora je dat na snimku na Slici 11(b).

Na Slici 11(c) je dat snimak struje i napona u ustaljenom režimu, pri pogonu kolica po horizontalnim šinama.

U ovom režimu efektivna vrednost struje pogonskog elektromotora motora je iznosila 15.70A, dok je efektivna vrednost linijskog napona na motoru iznosila 380V. Fazni pomeraj između struje i napona je iznosio približno 57° (≈1rad).

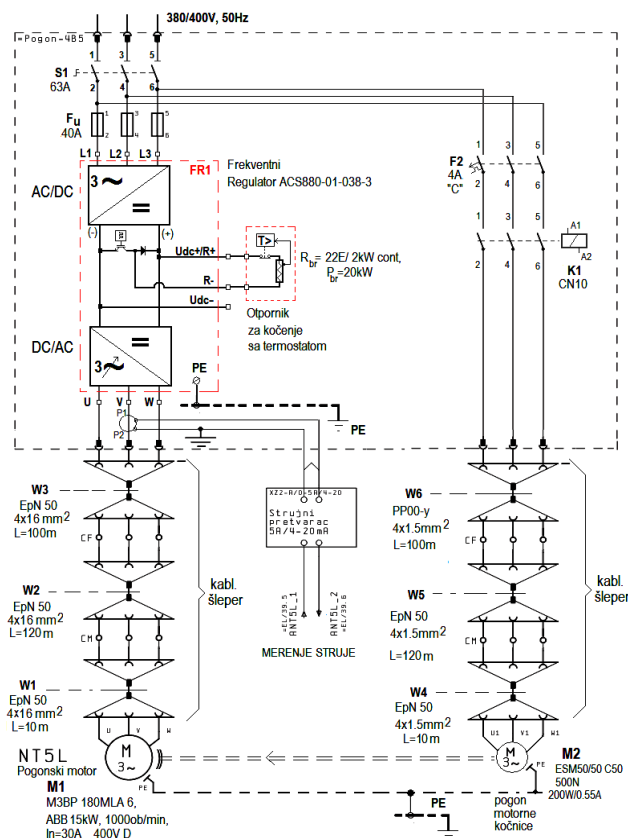
Pri ovim uslovima električna aktivna snaga motora je iznosila $P=1.73 \cdot U_{mot} \cdot I_{mot} \cdot \cos\varphi=1.73 \cdot 15.7A \cdot 380V \cdot 0.544=5.61kW$. Ova vrednost snage je duplo manja od nominalne i pri ovom režimu se koristi za savlađivanje stalnih otpora vuče pogonskih kolica na dopremi na traci T5L.

IV. NOVO PREDLOŽENO REŠENJE REGULISANOG ELEKTROMOTORNOG POGONA KOLICA

U okviru rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica trake T5L na dopremi uglja predviđena je zamena postojećeg pogona sa pogonskim indukcionim elektromotorom snage 11kW sa hidrodinamičkom spojnicom, sa novim pogonskim elektromotorom snage 15kW uz primenu frekventne regulacije. Frekventna regulacija je predviđena kao zamena za postojeće rešenje sa hidro-dinamičkom spojnicom, obzirom da je ono tokom radnog veka pogona poprilično dotrajalo i postalo je nepouzdan. Frekventnom regulacijom pogonskog elektromotora kolica se obezbeđuje pored kontrole brzine i kontrola momenta (pogonskog i kočionog), kao i kontrolisano ubrzavanje i usporavanje kolica i niz drugih zaštitnih funkcija regulisanog elektromotornog pogona (prekostrujna zaštita, prenaponska i podnaponska zaštita, zaštita od preopterećenja i sl.).

Upotrebom frekventne regulacije sa implementiranim direktnim upravljanjem po momentu (*Direct Torque Control-DTC*)[5-8], je ostvarena jedna veoma značajna dodatna funkcija regulisanog elektromotornog pogona, a to je dinamičko kočenje sa kontrolisanim momentom. Ova funkcija podrazumeva korišćenje čoperskog kola u kombinaciji sa otpornikom za kočenje u jednosmernom (DC) međukolu frekventnog regulatora.

Na crtežu koji je dat na Slici 12 je prikazana osnovna električna šema elektroenergetskog dela regulisanog pogona. U okviru nje je dato povezivanje frekventnog regulatora i pripadajućeg otpornika za dinamičko kočenje, kao i ostale elektro-energetске opreme[9].



Slika 12-Elektroenergetski deo regulisanog elektromotornog pogona kolica sa specificiranom opremom

Napajanje 3x380/400V, 50Hz regulisanog elektromotornog pogona kolica i pogonskog motora M1 se dobija sa sabirnica sopstvene potrošnje TENT-B, dok je sva elektroenergetska oprema smeštena u bloku "Pogon-4B5". U ovom bloku se napajanje dovodi preko trofaznog glavnog prekidača (sklopka-rastavljač) S1 koja je odabrana za nazivnu struju 63A. Preko ovog glavnog prekidača se napajaju frekventni regulator FR1 glavnog pogonskog elektromotora i pogon elektromotora kočnice. Zaštita od kratkog spoja na ulazu frekventnog regulatora je ostvarena trofaznim ultra-brzimi nožastim osiguračima Fu, nazivne struje 40A, koji su smešteni na odgovarajuće podnožje. Prekostrujna zaštita i zaštita od preopterećenja na izlazu FR1 je ostvarena u sklopu samog frekventnog regulatora i obezbeđuje fleksibilno i jednostavno podešavanje svih potrebnih zaštitnih strujnih pragova.

Na izlazu FR1 je obezbeđeno jednofazno merenje struje pogonskog motora (u fazi "V") mernim strujnim transformatorom prenosnog odnosa 50/5A, na čiji sekundar je vezan merni strujni pretvarač 5A/4÷20mA. Ovaj strujni signal se vodi ka nadređenom upravljačkom sistemu SCADA. Opciono se merenje struje može izvesti i sa analognog izlaza frekventnog regulatora, kao što je prikazano na električnoj šemi na Slici 13. Opseg strujnog signala na ovom analognom izlazu je 0-20mA. Napajanje pogonskog motora kočnice M2 se ostvaruje sa glavnog prekidača S1. Zaštita od kratkog spoja elektromotornog pogona kočnice se ostvaruje trofaznim automatskim prekidačem F2, klase "C" nazivne struje 4A. Uključenje pogonskog motora kočnice, kada se kočnica otpušta, se ostvaruje trofaznim

kontaktorom K1, tip CN10, koji se kontroliše sa digitalnog relejnog izlaza frekventnog regulatora, kao što pokazuje električna šema na Slici 12. Kriterijum za isključenje kontaktora motora kočnice (kada dolazi do hvatanja kočnice i kada ona mehanički koči pogon) je dostizanje praga brzine pogonskog elektromotora koji iznosi 10% od nominalne brzine.

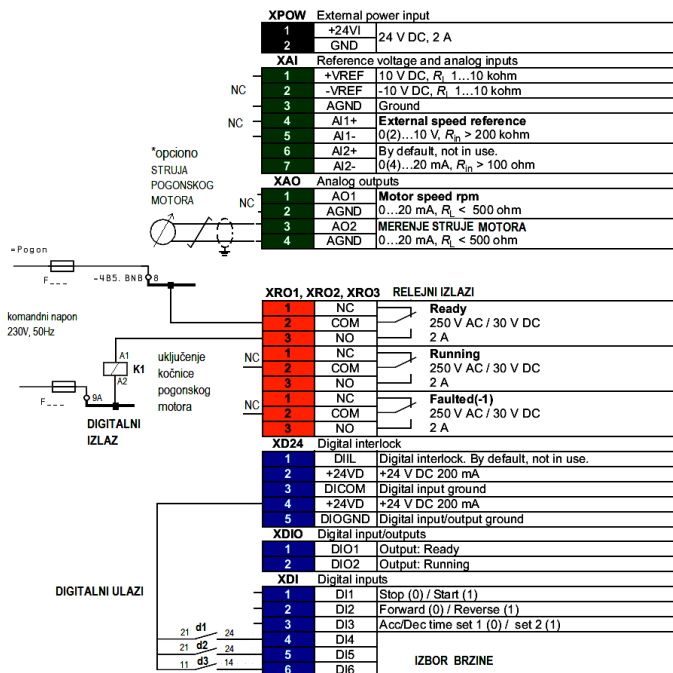
U novom rešenju pogona, se elektroenergetskom delu dodaje i upravljački deo sa primenom nove kombinacije komandnih tastera. U ovom slučaju su komandni tasteri integrisani u ručnu konzolu sa koje se zadaju smerovi kretanja (levo-desno) kao i referentne brzine pokretanja kolica (sporije i brže kretanje). Rekonstrukcijom pogona se predviđa rad kolica sa dve brzine, te je stoga predviđen komandni pult rukovaoca sa dva tastera, pri čemu je moguće ostvariti kombinaciju za dve brzine pokretanja kolica: jednu koja odgovara nominalnom režimu (nominalnoj brzini pokretanja) i drugu koja odgovara dvostruko manjoj brzini.

Projektom je dakle predviđeno zadavanje dva smera kretanja (smer "LEVO" i smer "DESNO"). Takođe moguće je zadati za svaki od smerova kretanja, dve referentne brzine pokretanja kolica, jedna niža i druga viša. Nivoi ovih referentnih vrednosti se mogu podešavati internim setovanjem u frekventnom regulatoru. Komande za smerove pokretanja "LEVO-DESNO" i za dve brzine pokretanja kolica se zadaju ravnopravno preko ručnih komandnih pulteva rukovaoca (pultevi "Pogon CLG" i "Pogon CLD").

Pogon kolica *LEVO-manja brzina* se ostvaruje sa komandnog pulta "Pogon CLG" pritiskom na taster SLGG1, odnosno sa komandnog pulta "Pogon CLD" pritiskom na taster SLDG1. Pritiskom na bilo koji od ovih tastera uključuje se pomoćno rele d1, koje svojim pomoćnim radnim kontaktom daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 4, na klemama digitalnih ulaza XDI, za pogon u levu stranu (detalj povezivanja je dat na Slici 13).

Slično se ostvaruje pogon kolica *DESNO-manja brzina*, samo se u ovom slučaju aktiviraju tasteri SLGD1 ili SLDD1. Pritiskom na ove tastere uključuje se pomoćno rele d2, koje svojim pomoćnim radnim kontaktom daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 5 (videti kleme digitalnih ulaza XDI), za pogon u desnu stranu, kao što je prikazano na Slici 13.

Pogon kolica *LEVO-veća brzina* se ostvaruje sa komandnog pulta "Pogon CLG" dodatnim pritiskom na taster SLGG1-a, odnosno sa komandnog pulta "Pogon CLD" pritiskom na taster SLDG1-a. U ovom slučaju su uključena pomoćna relea d1 i d3. Dakle dodatno, pored već aktiviranog relea d1, se uključuje i rele d3 (tzv. "rele veće brzine") ako se želi zadati veća brzina pokretanja kolica "LEVO". Svojim pomoćnim kontaktom rele d3, daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 6 -kleme digitalnih ulaza XDI, za pogon u levo i pri većoj brzini (detalj povezivanja je dat na Slici 13).



Slika 13- Upravljačka šema regulisanog pogona kolica i pogona kočnice

Treba napomenuti da je u relejnoj logici ostvarena međusobna blokada istovremenog uključivanja relea d1 i d2, odnosno komanda za istovremeni pogon kolica u levu i desnu stranu, kao što pokazuje relejna šema data na Slici 13.

U odnosu na prethodno rešenje, novim rešenjem sa frekventnom regulacijom je obezbeđeno nezavisno upravljanje kočnicom, posredstvom digitalnog izlaza frekventnog regulatora (relejni digitalni izlaz za 230V, 50Hz za struju 4A), kao što pokazuje električna šema upravljačkog dela koja je data na Slici 13. Kriterijum za prekidom napajanja (isključenjem) kočnice, kada se ustvari vrši aktiviranje kočenja, je dostizanje praga brzine kolica koji je nešto ispod 10% od nominalne brzine. Do tog praga, kočenje elektromotornog pogona kolica se ostvaruje dinamičkim čoperskom kolom za kočenje, koje je implementirano u samom frekventnom regulatoru.

Izbor frekventnog regulatora

Izbor frekventnog regulatora je izvršen na osnovu izabranog pogonskog elektromotora kolica (detaljni proračun je dat u mašinskom delu projekta)[9]. Na osnovu proračuna, odabran je IEC motor u stepenu zaštite IP55, proizvodnje ABB, tip 3GBP183410-ADG, nominalne snage 15kW, nominalne brzine obrtanja 977 ob/min (sinhrona brzina 1000 ob/min), linijskog napona 690V, 50Hz (za spregu statora u zvezdu-, „Y“), odnosno napona 400V, 50Hz (za spregu statora u trougao-, „Δ“). Nominalna struja motora je 31.5A, dok je polazna struja 5.8 puta veća od nominalne (odnosno $5.8 \cdot 31.5A = 182.5A$). Za izabrani elektromotor stepen iskorišćenja pri relativnoj vrednosti punog opterećenja (od 100%), je 90.24%. Faktor snage odabranog elektromotora pri punom opterećenju je 0.76. Ulazna električna snaga motora se izražava iz relacije:

$$P_{in} = P_{out} / \eta_{motora} \quad (7)$$

Za izlaznu snagu motora $P_{out} = 15kW$ i stepen iskorišćenja $\eta_{motora} = 0.902$, se dobija da je ulazna snaga elektromotora (a to je ustvari izlazna snaga frekventnog regulatora):

$$P_{in} = P_{FRout} = 15kW / 0.902 = 16.63kW$$

Nominalna ulazna struja motora je $I_n = 31.5A$, tako da struja frekventnog regulatora mora da zadovolji uslov:

$$I_{FRout} \geq I_n \quad (8)$$

Nominalna snaga frekventnog regulatora mora da zadovolji uslov:

$$P_{FRout} \geq P_{nmot} \quad (9)$$

Ako se usvoji da će frekventni regulator raditi u uslovima preopterećenja od 10% (a takođe to vodi ka izvesnoj sigurnosti i određenoj rezervi), dobija se da je potrebna snaga na izlazu frekventnog regulatora:

$$P_{FRout}^* = 16.63kW \cdot 1.1 = 18.23kW$$

Na osnovu prethodnog proračuna je odabran frekventni regulator ABB proizvodnje tip: ACS880-01-038A-3, nominalne izlazne aktivne snage 18.5kW i nominalne izlazne struje $I_{FRout} = 38A$. Na osnovu izbora frekventnog regulatora se zaključuje da on zadovoljava oba uslova, odnosno kriterijuma za izbor, koji su napred dati izrazima (8) i (9).

Treba napomenuti da frekventni regulator, pored regulacije brzine pogonskog elektromotora kolica i ima mogućnost direktne kontrole momenta, odnosno tzv. DTC kontrolu (*Direct Torque Control*). Ova kontrola momenta dobija na značaju kako tokom pokretanja, odnosno ubrzavanja kolica, tako i kod zaustavljanja, odnosno usporavanja kolica (kada je moguće ostvariti kontrolisano kočenje). Da bi se odredila ulazna snaga koju frekventni regulator uzima iz napojne mreže 3x400V, 50Hz, potrebno je uzeti u obzir gubitke u ulaznom ispravljaču (AC/DC pretvaranje) i izlaznom invertoru (DC/AC pretvaranje). Oba ova pretvarača su integrisana u frekventnom regulatoru. Gubici u ulaznom ispravljaču su posledica gubitaka u stanju vođenja ispravljačkih dioda. Gubici usled komutacija se u ovom ulaznom pretvaraču zanemaruju, obzirom da se radi o niskoj učestanosti preklapanja (mrežni ispravljač). Uz odgovarajuću rezervu, usvaja se da je disipacija na ulaznom ispravljačkom bloku približno jednaka $\Sigma P_{ispr}^* = 100W$. Ulazna snaga koju uzima kompletan AC/DC/AC pretvarač, odnosno frekventni regulator je $P_{inFR} = 18.6kW$. Za ovu vrednost snage i za usvojeni faktor snage ulaznog ispravljača od 0.8, dobija se da je ulazna struja frekventnog regulatora:

$$I_{inFR} = \frac{P_{inFR}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot \cos\phi_{ispr}} \quad (10)$$

Odnosno:

$$I_{inFR} = \frac{18.6kW}{1.73 \cdot 400V \cdot 0.8} = 34A$$

Ova ulazna struja služi za dimenzionisanje ulaznog glavnog prekidača sa koga se napajaju frekventni regulator i kočnica, ali i ulaznih zaštitnih elemenata frekventnog regulatora (osigurača,

AS prekidača i sl.). Na osnovu prethodnog proračuna predviđen je ulazni ultrabrzni nožasti osigurač F_u frekventnog regulatora, nazivne struje 40A, klase „D“ i prekidne moći (struja kratkog spoja) za minimalno 10kA.

Dimenzionisanje otpornika za kočenje

Otpornik za kočenje se nalazi u jednosmernom međukolu frekventnog regulatora i njegova šema povezivanja je data na električnoj šemi na Slici 12. Ovaj otpornik „prima energiju“ pogonskog elektromotora kada se on nalazi u režimu kočenja. Tada on ustvari radi u generatorskom režimu i energiju kočenja „ubacuje“ u jednosmerno među kolo. Jednosmerno međukolo je pažljivo projektovano i predviđeno je da može da primi oko 80% pune snage pogonskog motora. Ako se pretpostavi da se kočenje ostvaruje pri snazi 80% od pune (preporuka ABB proizvođača frekventnog regulatora), odnosno $0.8 \cdot 16.6kW$ i da je napon u jednosmernom međukolu u režimu kočenja oko 540V, dobija se da je vrednost kočionog otpornika [10-11]:

$$R_{br} = \frac{U_{dc}^2}{0.8P_k} \quad (11)$$

Odnosno ako se uvrste ulazni poznati podaci za prethodno navedene veličine, dobija se da je:

$$R_{br} = \frac{U_{dc}^2}{0.8P_k} = \frac{540^2}{0.8 \cdot 16600} = 21.95\Omega$$

Usvaja se vrednost kočionog otpornika $R_{br}^* = 22.\Omega$.

Struja u jednosmernom međukolu u režimu kočenja će iznositi:

$$I_{br} = \frac{U_{dc}}{R_{br}^*} \quad (12)$$

$$I_{br} = \frac{U_{dc}}{R_{br}^*} = \frac{540}{22} = 24.5A$$

U slučaju da kočenje traje maksimalno 30s (pesimistički slučaj), ukupna energija koja se disipira na otporniku je:

$$E_{br} = R_{br} \cdot I_{br}^2 \cdot t_k \quad (13)$$

Na osnovu poznatih ulaznih vrednosti se dobija da je ova energija:

$$E_{br} = 22 \cdot 24.5^2 \cdot 30s = 396kJ$$

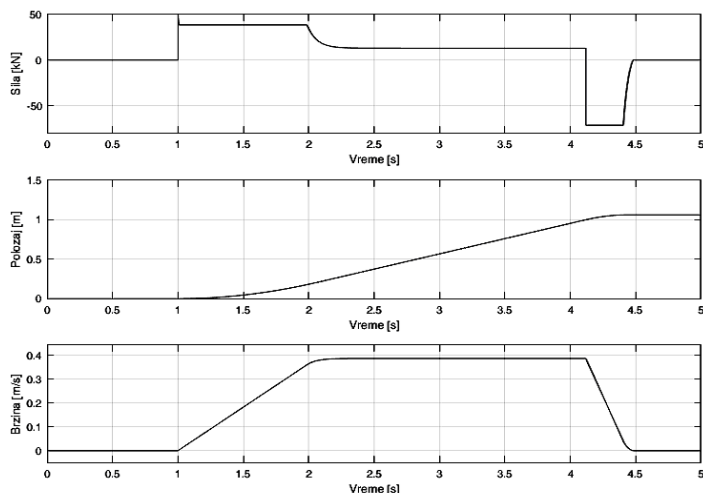
Na osnovu ovog proračuna ovim projektom je odabran kočioni otpornik: SACE 15RE22 proizvodnje ABB čiji su kataloški podaci: otpornost 22Ω, kontinualna snaga 2kW, snaga pri kočenju 15 kW, energija disipacije: 420kJ i presek priključnog kabla 6/10mm².

V. SIMULACIONA VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG REŠENJA

Kao što je prethodno napomenuto, novo rešenje zasniva se na korišćenju frekventnog regulatora pogonskog elektromotora za pokretanje kolica transportne trake. Obzirom da je u mašinskom delu izvršena rekonstrukcija lanca i zamena zavojnih opruga, gumenim oprugama (kombinacija krutosti i prigušenja), prilikom izrade simulacionog modela je pretpostavljeno da je lanac dobro zategnut. Novi elastični elementi-gumene opruge su sa malim hodom i odgovarajućim prigušenjem. Krutost novih opruga je k

= 2kN/mm. Ovo se pokazalo kao efikasno rešenje, obzirom da je njegovom primenom sprečeno spadanje lanca sa lančanika. U simulaciji je pretpostavljena veza pogonski motor-reduktor (bez hidro-dinamičke spojnice), obzirom da je stara hidro-dinamičku spojnica demontirana i jer nije potrebna (obzirom da je primenjena frekventna regulacija).

Ubrzavanje i usporavanje (kočenje) kolica sada se vrši frekventnim regulatorom bez oscilacija, a hidraulična kočnica se aktivira nakon zaustavljanja kolica. Simulacioni dijagrami dobijeni na osnovu kreiranja modela sistema su dati na Slici 14. Na simulacionim dijagramima su date tri ključne karakteristične veličine: pogonska sila kolica, položaj kolica i linearna brzina kretanja kolica po šinama. Simulacija je urađena za slučaj kretanja kolica kada operater zadaje komandu uključivanja sa implementiranim „mekanim startom“ pogona i komandu isključenja, nakon pomeranja kolica na dužini od 1m (ovaj slučaj je najčešće zastupljen tokom eksploatacionog režima rada elektromotornog pogona kolica).



Slika 14- Simulacioni dijagrami kretanja kolica na transportnoj traci T5L: sila, pomeraj i brzina (odozgo na dole)

Prilikom ubrzavanja kolica, ostvarena je pogonska sila od oko 38.5kN u intervalu od 1s, pri čemu se brzina uspostavlja od nulte brzine do vrednosti približno 0.4m/s. Pri ovome se ima konstantno ubrzanje pogona od 0.4m/s². Na kraju ovog intervala se ima pređeni put (hod) od približno 0.2m. Nakon ovog režima se kolica pokreću na šinama, savlađujući stalne otpore vuče: pogonska sila je približno 13kN, brzina 0.4m/s i na kraju ovog intervala se ima pređeni put od oko 4.2m. Prilikom zaustavljanja kolica, brzina se prvo smanjuje od vrednosti 0.4m/s do vrednosti 0.04m/s, a zatim se aktivira kočnica. Tokom smanjenja brzine primenjena je sila kočenja od -70kN u trajanju od 0.3s, kao što se vidi sa dijagrama na Slici 14. U ovom slučaju je maksimalni hod opruge jednak $L_0=5.3\text{mm}$. Shodno relaciji (6) i činjenici da je pre aktiviranja kočnice brzina kolica 0.04m/s, ukupni pređeni put je $L=4.3\text{mm}$, što je mnogo manje u odnosu na slučaj bez kočnice koji se imao u starom rešenju elektromotornog pogona kolica. Ovo takođe znači da neće doći do pojave oscilacija. Simulacija je pokazala da je nakon komande operatera za zaustavljanje, ukupno pređeno rastojanje (kočenje frekventnim

regulatorom+smirivanje) manje od 10cm, što bi u potpunosti zadovoljilo tehničke zahteve pouzdanog rada i kočenja elektromotornog pogona kolica.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljena ključna merenja na elektromotornom pogonu kolica na transportnoj traci T5L u sistemu na dopremi uglja na TENT-B i predlog novog rešenja regulisanog elektromotornog pogona zasnovanog na korišćenju frekventne regulacije sa direktnom kontrolom momenta (tzv. *Direct Torque Control*-DTC) kako pri pokretanju, tako i pri kočenju. Na osnovu izvršenih merenja su detektovani glavni problemi rada kolica koji su se ogledali u oscilatornim hodovima zavojnih opruga kolica, njihovom pucanju, spadanju lanca sa pogonskog lančanika, nepouzdanom kočenju i na kraju kao glavni problem tzv. „katapultiranje kolica“. Tokom eksploatacije je uočeno otežano upravljanje i precizno pozicioniranje u određenim položajima na šinama. Ovo se dešavalo prilikom dejstva inercijalnih sila usled pokretanja transportne trake na kolicima, ili usled promene smera njenog kretanja. U tom cilju, novim rešenjem je predloženo upravljanje kočnicom na pogonskom reduktoru kolica, kako bi kolica potpuno mirovala u pomenutim situacijama. Dodatni problem što se pouzdanog rada kočnice tiče, se odnosio na veliku koncentracije ugljene prašine i vlage u okruženju. Iz ovog razloga je kočenje je neefikasno, nepouzdan i veoma često je predstavljalo jedan od uzroka tzv. "katapultiranja" kolica i njihovog udaranja u granične odbojnice. Nakon merenja je urađen simulacioni model sistema u okviru kojeg su verifikovani mehanički i električni proračuni. Na postojećem pogonu je izvršena rekonstrukcija lanca i zamena zavojnih opruga, kompozitnim elastičnim (kombinacija krutosti i prigušenja), maksimalne sile 22.35kNm (po jednoj gumenoj opruzi), tip W22-358-0243, proizvodnje *Marsh Mellow FIRESTONE*. Nakon ove prve faze rekonstrukcije pogon kolica je već postao značajno stabilniji i pouzdaniji u odnosu na prethodno rešenje, i što je veoma bitno, sa oscilacijama hoda opruga svedenim na minimum. Dodatno poboljšanje i još stabilniji i pouzdaniji rad bi se mogao ostvariti regulisanim pogonom zasnovanim na primeni frekventne regulacije sa implementiranom DTC. U radu su prikazani simulacioni rezultati predloženog rešenja. Pravac daljeg unapređenja rešenja bi bili praktična realizacija novog regulisanog elektromotornog pogona, bez upotrebe hidro-dinamičke spojnice i njegovo testiranje i puštanje u rad u realnim eksploatacionim uslovima.

ZAHVALNICA

Istraživanje opisano u ovom radu finansirano je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

REFERENCES

- [1] M.Obradović, A.Jovović, D.Radić, M.Stanojević, D.Todorović, M.Jovanović, „Idejno rešenje sistema za kontrolu kvaliteta i količina primljenog uglja na Termoelektrani Nikola Tesla-B“, Zbornik radova 24. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji, PROCESING '11, God.24, Br.1, pp.1-12, Izdanje SMEITS, April 2011.

- [2] Z.N.Milovanović, Termoenergetska postrojenja - Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje, Mašinski fakultet, Univerzitet u B.Luci, 2011.
- [3] Ž.V.Despotović, A. M.Pavlović, U.Tanasić, N.Glišić „Rekonstrukcija elektro-hidrauličkog pogona strele kopača u sistemu na dopremi uglja u TENT-B“, Proceedings of International Conference POWER PLANTS 2018, November, 05th to November, 08th in Zlatibor, Serbia, pp. E2018-37/1-23.
- [4] <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>
- [5] Technical guide No. 1 „Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology“, ABB drives, 2011.
https://library.e.abb.com/public/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/ABB_Technical_guide_No_1_REVC.pdf
- [6] X.T.Garcia, B. Zigmund, A.Terlizzi, R.Pavlanin, L. Salvatore, L. "Comparison Between FOC and DTC strategies for Permanent Magnet". *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5 (1–2), March 2006.
- [7] J-N.Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder", *IEEE Transactions on Industry Applications*. 33 (2): 333–341, March 1997.
- [8] P.Tiitinen, M.Surandra, "The next generation motor control method, DTC direct torque control". Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. 1. pp. 37–43, 1995.
- [9] A.Jevtović, Ž.V.Despotović, D.Đokić, A.Ribić, R.Rakijaš, N.Vojinović, Tehnička dokumentacija rekonstrukcije upravljanja kolicima traka T5L i T5D u TENT-B, Obrenovac, TD 017, Reg.br. 19257, IMP Projektinženjering, Jun 2019.
- [10] Technical guide No.8-Electrical Braking, ABB drives, 2018.
- [11] H.Greiner, „Starting, braking, and positioning with three-phase cage induction motors“, Danfoss Bauer GmbH, Esslingen, 2001.

AUTORI

Prvi Autor – Dr Željko V.Despotović, dipl.el.inž, Naučni savetnik, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs

Drugi Autor – Dr Aleksandar Ribić, dipl.el.inž, Viši naučni saradnik, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, aleksandar.ribic@pupin.rs.

Treći Autor-Dejan Đokić, dipl.maš.inž., IMP-Projektinženjering, Beograd

Četvrti Autor-Ranko Rakijaš, dipl.maš.inž.,IMP-Projektinženjering, Beograd

Koresponding Autor – Dr Željko V. Despotović, dipl.el.inž, Institut M.Pupin, Volgina 15, Beograd 11060,

zeljko.despotovic@pupin.rs, zdespot@etf.rs,
Tel. 011/6771-024. , Mob.Tel. 063/331-645