



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



mr Vojkan Z. Kostić

**RAZVOJ UNAPREĐENIH UPRAVLJAČKIH SISTEMA
ZA ELEKTROMOTORNE POGONE KRANOVA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2024.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



mr Vojkan Z. Kostić

**DEVELOPMENT OF IMPROVED CONTROL SYSTEMS
FOR CRANE ELECTRIC MOTOR DRIVES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2024.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: Prof. dr Milutin Petronijević, vanredni profesor,
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu

Naslov: Razvoj unapređenih upravljačkih sistema za elektromotorne pogone
kranova

Rezime: Doktorska disertacija posvećena je razvoju unapređenih upravljačkih sistema za elektromotorne pogone kranova. Na osnovu uočenih praktičnih problema iz dugogodišnje eksploatacije kranova i razmatranja postojećih rešenja, u disertaciji je predloženo nekoliko inovativnih algoritama i tehničkih realizacija. Između ostalog, predloženo je sledeće: novi algoritam za regulaciju zakošenja konstrukcije kрана sa velikim rasponom, koji na jednostavan način može da se implementira u postojeće pogone uz minimalnu hardversku nadogradnju; nova realizacija algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu, koji na jednostavan način može da se implementira u postojeće pogone bez hardverske nadogradnje; nova metoda za izbor pogonskog motora i novi algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja; poboljšanje poznatog industrijskog rešenja za optimizaciju generatorskog režima rada motora kompletnog pogonskog sistema kрана. Sve prethodno navedeno, rezultat je detaljne matematičke i simulacione analize i/ili detaljne analize problema, a nakon praktične implementacije verifikovano je eksperimentalnim ispitivanjima i snimcima karakterističnih veličina.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina: Elektromotorni pogoni

Ključne reči: regulisani višemotorni pogoni, elektromotorni pogoni kranova, ravnomerna raspodela opterećenja, regulacija zakošenja, pogon monospiralnog kabl-bubnja, aktivni mrežni ispravljač

UDK: 621.313+681.518.52

CERIF klasifikacija: T 190 Elektroinženjering

Tip licence Kreativne zajednice: **CC BY-NC-ND**

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Prof. dr Milutin Petronijević, Associate Professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Development of improved control systems for crane electric motor drives
Abstract:	<p>The PhD thesis is devoted to the development of improved control systems for crane electric motor drives. Based on the observed practical problems from the long-time exploitation of cranes and consideration of existing solutions, the dissertation proposes several innovative algorithms and technical realizations. Among other things, something that will be proposed is: a new algorithm for the skew control of a wide-span crane construction, which can be easily implemented in existing drives with minimal hardware upgrade; a new realization of the algorithm for the load sharing between motors of controlled multi-motor drive, which can be easily implemented in existing drives without a hardware upgrade; a new method for the motor selection and a new control algorithm for the monospiral cable reel drive; one improvement of the known industrial solution for optimizing the generator mode of motor operation of the complete crane drive system. All mentioned above is the result of detailed mathematical and simulation analysis and/or detailed problem analysis, and after practical implementation, it was verified by experimental tests and recordings of characteristic quantities.</p>
Scientific Field:	Electrical Engineering and Computing
Scientific Discipline:	Electrical Drives
Key Words:	controlled multi-motor drives, crane electric motor drives, load sharing, skew control, monospiral cable reel drive, active front end rectifier
UDC:	621.313+681.518.52
CERIF Classification:	T190 Electrical engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Sadržaj

1. Uvod.....	7
2. Identifikacija problema kod električnih pogona kranova i predložena rešenja.....	16
2.1. Generatorski režim rada motora kod pogona dizanja	23
2.2. Tandemski rad kranova.....	31
3. Regulacija zakošenja i raspodele opterećenja u regulisanim višemotornim pogonima	36
3.1. Raspodela opterećenja.....	37
3.2. Regulacija zakošenja.....	40
3.2.1. Algoritam PLC programa za regulator zakošenja	47
3.3. Praktična realizacija raspodele opterećenja i regulacije zakošenja u regulisanim višemotornim pogonima inženjerskog objekta Pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta.....	54
3.4. Eksperimentalni rezultati za raspodelu opterećenja i regulaciju zakošenja u regulisanim višemotornim pogonima inženjerskog objekta Pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta.....	66
4. Pogon kabl-bubnja.....	88
4.1. Mehanika pogona kabl-bubnja.....	90
4.1.1. Moment, brzina i snaga asinhronog motora za pogon kabl-bubnja	98
4.1.2. Primer proračuna kabl-bubnja kod Derik kрана DK004	105
4.2. Izbor motora za pogon kabl-bubnja	111
4.2.1. Primer proračuna za izbor motora kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004.....	114
4.3. Algoritam upravljanja pogonom kabl-bubnja	120
4.3.1. Primer proračuna za potrebe algoritma upravljanja kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004	133
4.4. Praktična realizacija pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004.....	136
4.5. Eksperimentalni rezultati za pogon kabl-bubnja na Derik kranu DK004	140
5. Zaključak.....	146
Literatura	150
Prilozi	155
Prilog 1	156

Prilog 2.....	160
Prilog 3.....	166
Prilog 4.....	179
Prilog 5.....	185
Biografija autora.....	192

1. Uvod

Elektromotorni pogon je složen dinamički sistem koji se sastoji od više raznorodnih podsistema, koji uključuju mehaničke i električne elemente između kojih postoji međusobna interakcija. Složenost u pogledu egzaktno matematičke analize ogleda se u velikom broju diferencijalnih i algebarskih jednačina kojima ovaj sistem može da se opiše i modeluje. Osnovne komponente jednog standardnog industrijskog elektromotornog pogona su: električni motori, energetska pretvarači, mehanički prenosni uređaji i upravljački podsistem. Upravljački podsistem, realizovan lokalno, bez interakcije sa drugim pogonima, ili kao deo kompletnog upravljačkog sistema postrojenja, u značajnoj meri može da utiče na složenost elektromotornog pogona.

Savremeni industrijski elektromotorni pogoni najčešće su bazirani na primeni trofaznih asinhronih motora sa kratkospojenim rotorom. Osnovni razlozi za to su dobre upravljačke karakteristike, niska cena, velika pouzdanost i jednostavno održavanje. Poznata rešenja za regulaciju brzine/momenta asinhronih motora na bazi poluprovodničkih pretvarača napona i učestanosti primenljiva su u širokom opsegu napona i snaga. Zbog toga su upravo ovakvi elektromotorni pogoni postali dominantno industrijsko rešenje za regulisane pogone, pri čemu se, u zavisnosti od konkretne aplikacije i zahtevanih performansi, u razmatranje uzimaju različiti upravljački algoritmi.

Predmet ove disertacije su savremeni elektromotorni pogoni visokih performansi sa trofaznim asinhronim motorima sa kratkospojenim rotorom i trofaznim inverterima. Ovi pogoni najčešće se primenjuju u složenim tehnološkim procesima sa učešćem i interakcijom više motora u okviru jednog elektromotornog pogona. Kod ovakvih višemotornih, regulisanih pogona, u zavisnosti od tehnološkog procesa, regulacione veličine električnog motora mogu da budu najčešće brzina, a ređe moment ili pozicija. U organizaciji upravljačkog sistema pojedinih tehnoloških procesa ove regulacione veličine su inkorporirane kao elementi nadređenih upravljačkih struktura procesne regulacije.

Primena regulisanih višemotornih pogona veoma je česta u industriji. Regulacija rada motora kod višemotornih pogona rešava se na upravljačkom nivou celog višemotornog pogona, najčešće primenom programabilnih logičkih kontrolera (PLC) i industrijskih komunikacionih mreža. Po pravilu, visoke regulacione performanse postižu se primenom regulisanih elektromotornih pogona koji koriste različite metode vektorskog upravljanja za preciznu regulaciju veličina motora. S tim u vezi, predmet ove doktorske disertacije su regulisani elektromotorni pogoni koji su analizirani sa aspekta upravljačkog algoritma podsistema pretvarač-motor uz uvažavanje uticaja radnog mehanizma, odnosno momenta opterećenja, a u odnosu na željene performanse pogona.

Elektromotorni pogoni se primenjuju u različitim granama industrije, pri čemu opterećenja mogu da budu različite vrste radnih mehanizama. Predmet ove doktorske disertacije biće

elektromotorni pogoni kranova zbog karakterističnih regulacionih zahteva, režima rada i eksploatacionih uslova. Osim uobičajenih zahteva za podizanje/spuštanje tereta zadatom brzinom, mehanička sprega kod višemotornih pogona uvodi dodatne zahteve vezane za izjednačavanje opterećenja motora u zajedničkom radu. Kranovi velikih raspona sa elastičnom karakteristikom pogona kretanja zahtevaju posebna rešenja za eliminaciju zakošenja, uz posebne mere kojima se obezbeđuje zahtevana pouzdanost kompletnog sistema. Složena rotaciona kretanja, u kombinaciji sa translatornim, dovode do kompleksne analize sa aspekta izbora komponenti pogona i potrebe da se matematičkim modelovanjem i simulacijama izvrši optimalan izbor motora i pretvarača.

Regulisani višemotorni pogoni sa stanovišta matematičke analize, modelovanja i upravljanja detaljno su obrađeni u [1]. Posebna pažnja posvećena je uticaju prirode mehaničke sprege između motora višemotornog pogona. Priroda mehaničke sprege može da bude kruta, elastična, plastična i promenljiva. Takođe, između motora višemotornog pogona ne mora da postoji mehanička sprega. U [2,3] data je sistematizacija mehaničkih sprege između motora višemotornog pogona i osvrt na adekvatne upravljačke strukture. Poređenje različitih upravljačkih struktura kod regulisanih višemotornih pogona prezentovano je u [4]. U [5,6] dati su primeri primene elektromotornih pogona u različitim granama industrije (proizvodnja čelika, rudarstvo). Autor ove disertacije, vezano za primenu elektromotornih pogona u industriji, između ostalog, u [7-9] prezentuje primenu elektromotornih pogona u industriji šećera i rudarstvu.

Cilj naučnog istraživanja ove doktorske disertacije jeste razvoj unapređenih upravljačkih sistema za elektromotorne pogone kranova. S tim u vezi, opšti cilj naučnog istraživanja je identifikacija specifičnih problema koji se javljaju pri projektovanju, puštanju u rad i eksploataciji elektromotornih pogona kranova. Konkretni ciljevi naučnog istraživanja su najpre detaljna analiza identifikovanih problema, a zatim iznalaženje i testiranje sistematskih rešenja kojima se realizuje značajno poboljšanje performansi analiziranih elektromotornih pogona i kompletnih kranova.

U skladu sa opštim ciljem naučnog istraživanja, u poglavlju 2 najpre je izložena podela kranova prema mehaničkoj konstrukciji, a zatim klasifikacija elektromotornih pogona kranova saglasno nameni, sa posebnim osvrtom na prirodu mehaničke sprege između motora višemotornih pogona i na način upravljanja. Na osnovu literature i uočenih praktičnih problema iz dugogodišnje eksploatacije kranova, kao i na osnovu razmatranja postojećih rešenja, utvrđeni su očekivani praktični problemi u radu elektromotornih pogona i predložene su adekvatne metode za rešavanje problema.

Kranovi, sa stanovišta mehaničke konstrukcije, detaljno su obrađeni u [10-12]. Između ostalog, u [10-12] izložena je podela kranova prema mehaničkoj konstrukciji i data je klasifikacija

elektromotornih pogona kranova saglasno nameni. U Republici Srbiji, pravni okvir koji uređuje oblast kranova predstavlja [13], gde su, između ostalog, propisani tehnički uslovi i zahtevi koji moraju biti ispunjeni pri projektovanju, proizvodnji, montaži, rukovanju i održavanju kranova. Takođe, u [13] je data i podela kranova prema mehaničkoj konstrukciji. Autor ove disertacije, vezano za klasifikaciju elektromotornih pogona kranova saglasno nameni, u [7-9,14] između ostalog prezentuje elektromotorne pogone konkretnog pretovarnog mosta i konkretnog Derik krana.

U savremenom društvu primena elektromotornih pogona veoma je rasprostranjena, od onih malih snaga koji se sreću u domaćinstvima, do industrijskih elektromotornih pogona koji mogu da budu veoma velikih snaga. Elektromotorni pogoni imaju i najveći udeo u potrošnji električne energije u industriji, koji je prema nekim istraživanjima između 70 % i 75 %. Samim tim, elektromotorni pogoni predstavljaju veliki resurs za uštedu električne energije. Ušteda električne energije može da se postigne izborom motora adekvatne snage, izborom motora više klase efikasnosti, primenom regulisanih elektromotornih pogona i optimizacijom kompletnog postrojenja. Sve napred navedeno tema je u [15-17], a autor ove disertacije datu problematiku razmatra u [8].

U cilju povećanja elektroenergetske efikasnosti kranova i povećanja imunosti na narušen kvalitet napajanja, u poglavlju 2.1 predložen je koncept napajanja elektromotornih pogona kranova koji se bazira na zajedničkom jednosmernom kolu i aktivnom mrežnom ispravljanju sa oblikovanjem ulaznih struja. Optimizacija kompletnog postrojenja realizovana je tako što je poznato industrijsko rešenje inovirano specifičnim načinom regulacije elektromotornih pogona krana, sa osnovnom idejom da se vraćanje energije u mrežu svede na minimum. Time je rešen problem nepotrebnih gubitaka i postignuta je ušteda električne energije.

Koncept napajanja postrojenja na bazi zajedničkog jednosmernog kola razmatran je u [2,3,18,19], dok je primena aktivnog mrežnog ispravljača razmatrana u [19-23]. Osnovne karakteristike aktivnog mrežnog ispravljača sa stanovišta uticaja na mrežu su dobro oblikovanje ulaznih struja što obezbeđuje veoma nizak sadržaj viših harmonika, kao i regulacija faktora snage i mogućnost rada sa jediničnim faktorom snage. Sa stanovišta uticaja aktivnog mrežnog ispravljača na napajanje elektromotornih pogona, ima se dobra regulacija jednosmernog napona. Dobro oblikovanje ulaznih struja obezbeđuje *LCL* filter sa otpornikom za prigušenje, koji se montira na strani mreže aktivnog mrežnog ispravljača. Projektovanje *LCL* filtra razmatrano je u [24-28], dok je poređenje performansi različitih filtera realizovano u [29]. Autor ove disertacije datu problematiku razmatra u [8,9], dok [8] predstavlja i osnovu za pisanje poglavlja 2.1.

Predloženi koncept napajanja elektromotornih pogona kranova praktično je primenjen na Derik kranu DK004, koji je instaliran na montažnom placu u RB Kolubara i koji je, pre svega, namenjen je za montažu rudarske opreme. U cilju utvrđivanja performansi predloženog rešenja, a nakon puštanja u rad Derik kрана DK004, prikazane su eksperimentalno snimljene vremenske zavisnosti karakterističnih veličina.

Povremeno može da se javi potreba da kran manipuliše opterećenjem iznad definisane nosivosti. Rešenje navedenog problema predstavlja tandemski rad kranova. Pored povećanja nosivosti, tandemski rad kranova primenjuje se i pri manipulaciji sa geometrijski izrazito nesimetričnim opterećenjima. Sa stanovišta upravljanja, u naučnoj literaturi problem tandemskog rada nije dovoljno obrađivan [30]. Navedenom problemu pažnju posvećuju samo proizvođači kranova, koji nude gotova rešenja.

Klasično rešenje za tandemski rad kranova podrazumeva prisustvo rukovaoca na svakom kranu. Nedostaci ovog rešenja su potreba za većim brojem rukovaoca, koji mora da bude jednak broju kranova, kao i komunikacija između većeg broja osoba, što može da dovede do zabune i nekoordinisanog rada.

U poglavlju 2.2 prezentovano je unapređeno rešenje, koje prevazilazi navedene nedostatke. Predloženo rešenje praktično je primenjeno na montažnom placu u RB Kolubara, gde je realizovan tandemski rad dva pokretna Derik kрана, DK003 i DK004, namenjena za montažu rudarske opreme. Unapređenje postojećeg klasičnog rešenja omogućava tandemski rad kranova sa jednim rukovaocem. Na taj način, broj rukovaoca je smanjen u odnosu na klasično rešenje čime je postignuta ušteda u angažovanom osoblju i eliminisana mogućnost nekoordinisanog rada. Naravno, smanjen je i broj osoba u komunikaciji pri manipulacijama opterećenjem, što za posledicu ima manju verovatnoću zabune.

U okviru jednog tehnološkog procesa, dva ili više motora koji rade zajedno vrlo često su u mehaničkoj sprezi, direktno preko transmisionih mehanizama ili indirektno preko materijala koji se obrađuje u datom procesu [1-3]. U tom slučaju, osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred regulisanim višemotornim pogonom jeste da svi motori koji pokreću zajedničko opterećenje dele isto srazmerno nominalnim snagama motora. Imajući to u vidu, veoma je značajno iznalaženje praktičnog rešenja koje na jednostavan način rešava problem ravnomerne raspodele opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu.

U naučnoj literaturi zastupljena je analiza problema ravnomerne raspodele opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu [31-32]. Međutim, što se tiče praktične primene, proizvođači opreme problem ravnomerne raspodele opterećenja rešavaju regulatorima

unutar frekvencijskih pretvarača [33-35]. To za posledicu ima ograničenu fleksibilnost pri projektovanju regulatora, pre svega jer sam algoritam rada nije dovoljno poznat, ali i neophodnost korišćenja opreme samo jednog proizvođača. Iz tog razloga, u poglavlju 3.1 predložen je efikasan algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu i detaljno je analizirano projektovanje regulatora raspodele opterećenja. U odgovarajućem hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone, a koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih nekom od industrijskih komunikacionih mreža, implementacija predloženog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja jednostavna je i ne zahteva dodatni hardver. Eksperimentalnim podešavanjem parametara regulatora raspodele opterećenja mogu se dobiti željene performanse pogona. Autor ove disertacije datu problematiku razmatra u [9,14,36,37].

Predloženi algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu praktično je primenjen na pretovarnom mostu, instaliranom na otvorenom skladištu šećerne repe u Fabrici šećera TE-TO Senta (u pogonu kretanja kolica i pogonu kretanja mosta), kao i na Kranu broj 4, instaliranom na otvorenom skladištu u Fabrici cementa Lafarge BFC Beočin (u pogonu kretanja kolica, pogonu kretanja mosta i pogonu dizanja grabilice). U poglavlju 3.3 izložena je praktična realizacija predloženog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta, i to u pogonu kretanja kolica i pogonu kretanja mosta [9,14,36,37].

Nakon praktične realizacije predloženog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta, a u cilju utvrđivanja performansi, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina. U cilju komparativne analize, vremenske zavisnosti su snimljene sa isključenim i uključenim regulatorima raspodele opterećenja. U poglavlju 3.4 prikazane su eksperimentalno snimljene vremenske zavisnosti karakterističnih veličina i izložena je komparativna analiza dobijenih rezultata [9,14,36,37].

U industriji se često sreću i regulisani višemotorni pogoni sa velikim rasponom, koji služe za transport robe i materija. Konstrukcijski, ovi pogoni se sastoje od dve pokretne noge povezane mostom, što kao celina čini portal. Kod pogona sa velikim rasponom veoma čest praktičan problem jeste pojava zakošenja konstrukcije. Najčešći uzroci zakošenja su geometrijska nesavršenost konstrukcije, elastičnost konstrukcije, proklizavanje jedne strane u odnosu na drugu, neravnomerno opterećenje pojedinih strana zbog položaja tereta, kao i uticaj vetra kod pogona na otvorenom [10]. Posledica nedozvoljeno velikog zakošenja može da bude oštećenje konstrukcije, a u najgorem slučaju i njeno uništenje. Na slici 1.1 prikazan je stari pretovarni most na otvorenom skladištu šećerne repe u Fabrici šećera TE-TO Senta koji je, usled nedozvoljeno velikog zakošenja,

spao sa šina i prevrnu se, što je za posledicu imalo uništenje konstrukcije [36]. Imajući u vidu napred navedeno, osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred regulisanim višemotornim pogonom sa velikim rasponom jeste sinhrono odnosno centrirano kretanje obe strane. U skladu s tim, veoma je značajno iznalaženje praktičnog rešenja koje na jednostavan način rešava problem regulacije zakošenja.



Slika 1.1. Stari pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta

Analiza problema regulacije zakošenja, iako od velike važnosti za funkcionisanje regulisanih višemotornih pogona sa velikim rasponom, nije dovoljno zastupljena u literaturi. Problem zakošenja kod kranova, pre svega sa stanovišta mehaničke konstrukcije ali i regulacije, detaljno je analiziran u [10]. Specifični problem zakošenja kontejnera kod kontejnerskih kranova analiziran je u [38,39]. Iz tog razloga, u poglavlju 3.2 predložen je novi algoritam za regulaciju zakošenja i detaljno je analizirano projektovanje regulatora zakošenja. U odgovarajućem hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone, a koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih nekom od industrijskih komunikacionih mreža, implementacija predloženog algoritma za regulaciju zakošenja je jednostavna, a uz minimalnu hardversku nadogradnju. Neophodan dodatni hardver čine dva apsolutna enkodera i dva induktivna davača sa odgovarajućim markerima, čiji se broj dobija proračunom. Projektovanjem regulatora zakošenja na opisan način, uz eksperimentalnu proveru, mogu se dobiti željene performanse pogona. Autor ove disertacije datu problematiku razmatra u [9,14,36,37,40-43].

Predloženi algoritam za regulaciju zakošenja u regulisanom višemotornom pogonu sa velikim rasponom praktično je primenjen na pretovarnom mostu, instaliranom na otvorenom skladištu šećerne repe u Fabrici šećera TE-TO Senta (u pogonu kretanja mosta), kao i na Kranu broj 4, instaliranom na otvorenom skladištu u Fabrici cementa Lafarge BFC Beočin (u pogonu kretanja mosta). Kod navedenog pretovarnog mosta i kрана značajno se razlikuju rasponi, dužine

kranske staze i brzine kretanja. U poglavlju 3.3 izložena je praktična realizacija predloženog algoritma za regulaciju zakošenja na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta [9,14,36,37,40-43].

Nakon praktične realizacije predloženog algoritma za regulaciju zakošenja na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta, a u cilju utvrđivanja performansi regulatora zakošenja, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina. U poglavlju 3.4 prikazane su eksperimentalno snimljene vremenske zavisnosti i izložena je detaljna analiza dobijenih rezultata [9,14,36,37,40-43].

Pokretni kranovi sa dugom kranskom stazom za napajanje, a nekad i za prenos podataka sa spoljnjim svetom, najčešće koriste fleksibilne kablove. Da bi pri kretanju kрана napajanje fleksibilnim kablom bilo moguće, neophodan je sistem za namotavanje i odmotavanje kabla čija je brzina obrtanja sinhronizovana sa translatornom brzinom kretanja kрана. Taj sistem se naziva pogon kabl-bubnja.

Analiza pogona kabl-bubnja, iako je ovaj pogon od velike važnosti za funkcionisanje kрана, nije dovoljno zastupljena u naučnoj literaturi. Najčešće se razmatraju znatno složeniji sistemi, kao što je npr. regulacija sile zatezanja kod premotača u industriji papira, kod namotača u prerađivačkoj industriji itd. [44]. Proizvođači kranske opreme pogonu kabl-bubnja posvećuju znatno veću pažnju, kako sa stanovišta mehaničke konstrukcije [45], tako i sa stanovišta upravljanja [46-49]. Međutim, literatura proizvođača opreme očekivano je orijentisana samo ka sopstvenim proizvodima, pa njeno korišćenje za posledicu ima ograničenu fleksibilnost pri projektovanju i neophodnost korišćenja opreme samo jednog proizvođača. Izuzetak je [49], gde je, između ostalog, prezentovan opšteprimenjiv proračun mehanizma kabl-bubnja. Autor ove disertacije datu problematiku razmatra u [50,51], što predstavlja i osnovu za pisanje poglavlja 4.

Projektovanje pogona kabl-bubnja nije jednostavno i zavisi od mnogo faktora, od kojih je ne mali broj promenljiv pri kretanju kрана, a samim tim i u vremenu, i to u širokom opsegu (npr. spoljašnji prečnik namotanog kabla, moment inercije kabla na kabl-bubnju, brzina obrtanja kabl-bubnja, moment kabl-bubnja). Takođe, kod kabl-bubnja uvek je osnovni zahtev održavanje konstantne sile zatezanja kabla, što omogućava ravnomerno namotavanje, odnosno odmotavanje kabla. Napred navedeno znatno komplikuje izbor motora za pokretanje pogona kabl-bubnja i ima veliki uticaj na izbor adekvatnog algoritma upravljanja.

U poglavlju 4 detaljno je analiziran pogon kabl-bubnja za namotavanje, odnosno odmotavanje napojnog kabla pokretnog kрана, kod kojeg se kabl-bubanj pokreće trofaznim asinhronim motorom napajanim iz frekvencijskog pretvarača, a kabl na kabl-bubnju namotava u jednom sloju (monospiralni kabl-bubanj).

Detaljan matematički model pogona monospiralnog kabl-bubnja sa stanovišta mehaničke konstrukcije izložen je u poglavlju 4.1. Verifikacija matematičkog modela realizovana je korišćenjem simulacionog modela pogona monospiralnog kabl-bubnja na Derik kranu DK004.

Matematički model iz poglavlja 4.1 uprošćen je nakon kompleksne analize, što je prezentovano u poglavlju 4.2. Verifikacija uprošćenog matematičkog modela realizovana je korišćenjem simulacionog modela (Derik kran DK004). Uprošćenje matematičkog modela urađeno je u cilju formiranja inženjerski primenljivog rešenja za izbor pogonskog motora. Rezultat je nova metoda za izbor pogonskog motora monospiralnog kabl-bubnja, koja je verifikovana korišćenjem simulacionog modela (Derik kran DK004) [50,51]. Predložena metoda praktično je primenjena kod dva Derik kрана, DK003 i DK004, koji su instalirani na montažnom placu u RB Kolubara i koji su, pre svega, namenjeni za montažu rudarske opreme.

Nakon detaljne analize mehaničke konstrukcije i analize rada pogona kabl-bubnja, u poglavlju 4.3 predložen je novi algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja. Predloženi algoritam bazira se na upravljanju po momentu bez davača sile zatezanja kabla, odnosno na indirektnoj regulaciji sile zatezanja. U odgovarajućem hardverskom okruženju koje je karakteristično za elektromotorne pogone, a koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih nekom od industrijskih komunikacionih mreža, implementacija predloženog algoritma upravljanja je jednostavna, a uz minimalnu hardversku nadogradnju. Neophodan dodatni hardver čine uvodnik kabl-bubnja adekvatne mehaničke konstrukcije sa odgovarajućim brojem digitalnih davača. Predloženi algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja verifikovan je korišćenjem simulacionog modela (Derik kran DK004).

Novi algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja praktično je primenjen kod dva Derik kрана, DK003 i DK004, koji su instalirani na montažnom placu u RB Kolubara i koji su, pre svega, namenjeni za montažu rudarske opreme. U poglavlju 4.4 izložena je praktična realizacija predloženog algoritma upravljanja kod Derik kрана DK004 [50,51].

Nakon praktične realizacije predloženog algoritma upravljanja kod Derik kрана DK004, a u cilju utvrđivanja performansi pogona kabl-bubnja, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina. U poglavlju 4.5 prikazane su eksperimentalno snimljene vremenske zavisnosti i izložena je detaljna analiza dobijenih rezultata [50,51].

Rezultati naučnog istraživanja, prezentovani u ovoj doktorskoj disertaciji, sumirani su u poglavlju 5. Takođe, u ovom poglavlju navedeni su i naučni doprinosi doktorske disertacije.

2. Identifikacija problema kod električnih pogona kranova i predložena rešenja

Kranovi (dizalična postrojenja, dizalice) su transportne mašine namenjene za vertikalni transport tereta. Koriste se u svim granama industrije. Njihova uloga može da bude prosta, kao što je vertikalni transport tereta u jednoj osi, ali i veoma složena, kao što je implementacija u različitim tehnološkim procesima. U zavisnosti od oblasti primene, mehanička konstrukcija kranova značajno može da se razlikuje. Imajući u vidu da mehanička konstrukcija kрана u najvećoj meri određuje električne pogone kрана, što direktno utiče na projektovanje samog kрана, u daljem tekstu biće izložena podela kрана prema mehaničkoj konstrukciji.

Prema mehaničkoj konstrukciji kranovi mogu da se podele na sledeći način [12,13]:

- mosni kranovi (eng. Overhead (Bridge) Cranes)
- portalni kranovi (eng. Gantry Cranes)
- kranovi sa pokretnim krakom (kranovi sa strelom) (eng. Jib Cranes)
- toranjski kranovi (eng. Tower Cranes)
- kontejnerski kranovi (eng. Container Cranes)

Napomena: data je samo podela kрана za čije se pokretanje koristi električna energija.

Mosni kranovi najzastupljeniji su u industriji. Njihova osnovna konstrukcija je u obliku mosta koji se svojim krajevima oslanja na potpore malo ispod nivoa mosta, pri čemu potpore nisu deo kрана.

Most kрана izrađuje se od jednog, dva ili rede više glavnih nosača (greda). Tipičan mosni dvogredi kran prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Mosni dvogredi kran (slika preuzeta sa internet adrese

<https://www.hsn.com.tr/urun/cift-kiris-koprulu-vinc-sistemleri-91> dana 28.09.2023. god.)

Most kрана može da bude nepokretan, što se retko sreće, i pokretan u jednoj osi. Pogon kretanja mosta po pravilu je višemotorni, a čine ga najčešće dva ili četiri motora. Motori višemotornog pogona kretanja mosta su u mehaničkoj sprezi pa se javlja problem raspodele opterećenja između motora. Takođe, u slučaju velikog raspona mosta veoma čest praktičan problem jeste pojava zakošenja. Ovi problemi detaljno su analizirani u poglavlju 3. Predložen je algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu i algoritam za regulaciju zakošenja u regulisanom višemotornom pogonu sa velikim rasponom.

Mosni kran najčešće poseduje kolica („mačku“) koja se kreću duž mosta, u jednoj osi. Pogon kretanja kolica može da bude jednomotorni ili višemotorni, kada ga čine dva ili četiri motora. Motori višemotornog pogona kretanja kolica su u mehaničkoj sprezi pa se javlja već pomenuti problem raspodele opterećenja između motora.

Mosni kran, kao i svi ostali kranovi, mora da poseduje pogon dizanja. U zavisnosti od namene kрана postoje različita konstruktivna rešenja mehanizma za dizanje (na bazi kuke, grabilice, elektromagneta...), što direktno utiče na koncepciju pogona dizanja. Pogon dizanja može da bude jednomotorni ili višemotorni, kada ga najčešće čine dva motora. Motori višemotornog pogona dizanja najčešće nisu u mehaničkoj sprezi. Međutim, kod grabilice vrlo često jesu u mehaničkoj sprezi, pa se javlja već pomenuti problem raspodele opterećenja između motora. Takođe, nezaobilazan problem koji se javlja kod pogona dizanja je generatorski režim rada motora pri spuštanju tereta. Ovaj problem analiziran je u poglavlju 2.1.

Kada je most kрана pokretan, napajanje kрана električnom energijom realizuje se najčešće kliznim vodovima primenom oduzimača struje, a ređe fleksibilnim kablom primenom kabl-bubnja. Postoje različita konstruktivna rešenja mehanizma kabl-bubnja, što direktno utiče na projektovanje pogona kabl-bubnja. Detaljna analiza pogona kabl-bubnja kod kojeg se kabl-bubanj pokreće trofaznim asinhronim motorom napajanim iz frekvencijskog pretvarača, a kabl na kabl-bubnju namotava u jednom sloju (monospiralni kabl-bubanj) data je u poglavlju 4.

Portalni kranovi imaju noseću konstrukciju (portal) koja u vertikalnoj ravni ima oblik „П“ rama. Portal se svojim nogama oslanja na tlo ili potpore koje su znatno ispod nivoa vrha portala. Najčešće je jedna noga kruta a druga zglobova (pendel noga). Kao i kod mosnih kranova, u zavisnosti od namene, postoje različita konstruktivna rešenja mehanizma za dizanje: na bazi kuke, grabilice, elektromagneta...

Tipičan portalni dvogredi kran prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2. Portalni dvogredi kran (slika preuzeta sa internet adrese <https://www.hsn.com.tr/urun/cift-kirisli-portal-vincler-86> dana 28.09.2023. god.)

Pretovarni mostovi su posebna vrsta portalnih kranova koja u zavisnosti od namene, pored nekog mehanizma za dizanje, na nosećoj konstrukciji poseduje i mehanizme za transport (dodavači, transporteri, odlagači, presipna mesta, bunker...). Pretovarni mostovi rade na otvorenom prostoru, pa je noseća konstrukcija najčešće rešetkasta da bi se smanjio uticaj vetra.

Pretovarni most na otvorenom skladištu šećerne repe prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3. Pretovarni most

Portal kрана je pokretan, najčešće po šinama u jednoj osi, a ređe korišćenjem gusenica ili pneumatika. Pogon kretanja portala uvek je višemotorni, a čine ga najčešće dva ili četiri motora. Što se tiče problema raspodele opterećenja između motora i pojave zakošenja portala, važe isti zaključci kao i kod mosnog kрана.

Kada je predviđeno kretanje portala po šinama na otvorenom ili natkrivenom prostoru, obavezna je ugradnja mehanizama za sidrenje portala da bi se sprečilo neželjeno pokretanje zbog

uticaja vetra. Mehanizmi za sidrenje mogu da budu ručni ili elektromotorni. Elektromotorna sidra pokreću se pogonom sidrenja, koji je uvek jednomotorni.

Portalni kran najčešće poseduje kolica („mačku“), mora da poseduje pogon dizanja i mora da se napaja električnom energijom. Napajanje kрана električnom energijom, za razliku od mosnih kranova, realizuje se najčešće fleksibilnim kablom primenom kabl-bubnja a ređe kliznim vodovima primenom oduzimača struje. Za navedene mehanizme i pripadajuće pogone važe isti zaključci kao i kod mosnog kрана.

Pretovarni mostovi, pored navedenih pogona karakterističnih za portalne kranove, poseduju i pogone za pokretanje dodatnih mehanizama, a u zavisnosti od namene. Ovi pogoni ovde neće biti razmatrani.

Kranovi sa pokretnim krakom (kranovi sa strelom) su karakteristični po pokretnom kraku (streli) koji je na jednom kraju zglobovno vezan za noseću konstrukciju kрана. Zglob omogućava promenu ugla pokretnog kraka u vertikalnoj ravni, a samim tim i promenu dohvata. Iz tog razloga ovi kranovi ne poseduju kolica („mačku“). Kranovi sa pokretnim krakom mogu da budu nepokretni ili pokretni. Pokretni kran se dobija montažom na portal. Postoje različite konstrukcije ovih kranova i, u zavisnosti od namene, različita konstruktivna rešenja mehanizma za dizanje: na bazi kuke, grabilice, elektromagneta...

Jedno konstruktivno rešenje kрана sa pokretnim krakom je Derik kran (slika 2.4).

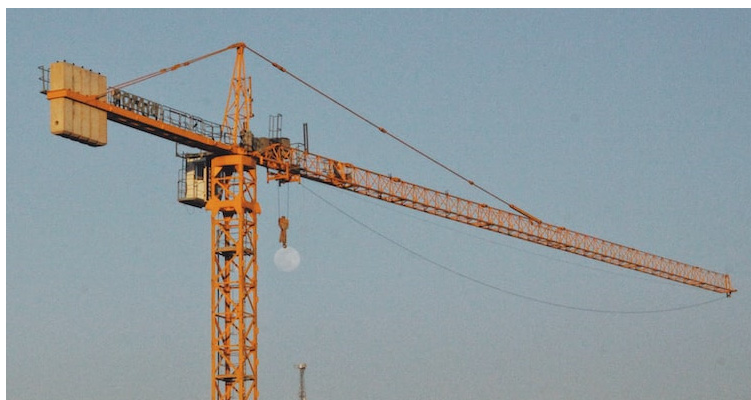


Slika 2.4. Derik kran (slika preuzeta sa internet adrese <http://www.eohic.com/construction-equipment/derrick-crane/derrick-crane-35m-3-6-18t.html> dana 28.09.2023. god.)

Pogon promene dohvata po prirodi odgovara pogonu dizanja, tako da za njega važe isti zaključci kao i za pogon dizanja.

Kran sa pokretnim krakom mora da poseduje pogon dizanja i mora de se napaja električnom energijom. Ukoliko je pokretan, mora da poseduje i pogon kretanja portala. Za navedene mehanizme i pripadajuće pogone važe isti zaključci kao i kod mosnog i portalnog kрана.

Toranjski kranovi se još nazivaju i građevinski kranovi (građevinske dizalice), jer je njihova najčešća primena u građevinarstvu. Noseću konstrukciju kрана čine toranj (stub) i krak (strela). Obično su nepokretni, ali mogu da budu i pokretni. Pokretni kran se dobija montažom postolja tornja na šine. Toranjski kranovi rade na otvorenom prostoru, pa je noseća konstrukcija rešetkasta da bi se smanjio uticaj vetra. Tipičan toranjski kran prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5. Toranjski kran (slika preuzeta sa internet adrese <https://unsplash.com/photos/7jXloyafUY> dana 28.09.2023. god.)

Toranjski kranovi karakteristični su po mehanizmu za obrtanje, koji je najčešće smešten pri vrhu tornja i omogućava obrtno kretanje vrha tornja i strele. Kod kranova manje nosivosti i visine mehanizam za obrtanje može da bude smešten i pri dnu tornja. U tom slučaju omogućava obrtno kretanje i tornja i strele. Pogon obrtanja može da bude jednomotorni ili višemotorni, kada ga najčešće čine dva motora. Motori višemotornog pogona obrtanja su u mehaničkoj sprezi pa se javlja već pomenuti problem raspodele opterećenja između motora.

Toranjski kran najčešće ima horizontalnu strelu, koja ne može da menja ugao u vertikalnoj ravni. U tom slučaju, da bi se obezbedila promena dohvata, na streli se montiraju kolica („mačka“). Za pogon kretanja kolica važe isti zaključci kao i kod mosnog kрана. Umesto horizontalne strele, toranjski kran može da ima pokretni krak koji obezbeđuje promenu dohvata, pa kolica nisu potrebna. Za pogon promene dohvata važe isti zaključci kao i kod kрана sa pokretnim krakom.

Toranjski kran mora da poseduje pogon dizanja i mora da se napaja električnom energijom. Ukoliko je pokretan, mora da poseduje i pogon kretanja kрана. Za navedene mehanizme i pripadajuće pogone važe isti zaključci kao i kod mosnog i portalnog kрана.

Kontejnnerski kranovi su ustvari portalni kranovi specijalne namene. Koriste se za utovar i istovar kontejnera, kao i za slaganje kontejnera u kontejnerskom dvorištu ili skladištu. Primer kontejnerskog kрана prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6. Kontejnerski kran (slika preuzeta sa internet adrese <https://www.dqcranes.com/port-crane/rail-mounted-container-gantry-crane.html> dana 28.09.2023. god.)

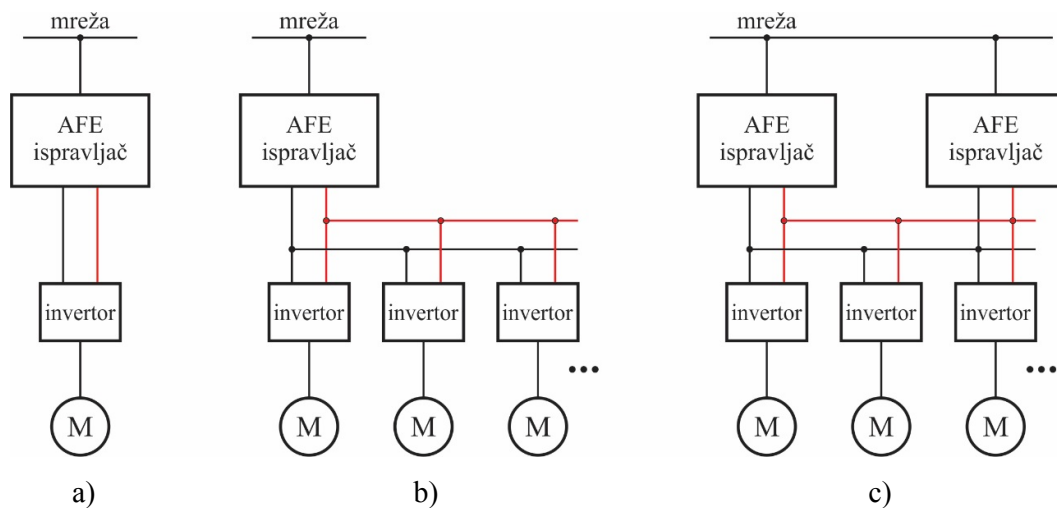
Osnovna karakteristika kontejnerskih kranova su mehanizam za hvatanje kontejnera i mehanizam za obrtanje hvatača. Pogon hvatanja kontejnera, kao i pogon obrtanja hvatača, najčešće je višemotorni i čine ga dva motora. Motori ovih višemotornih pogona nisu u mehaničkoj sprezi.

Ostali mehanizmi i pripadajući pogoni kontejnerskog kрана isti su kao i kod portalnog kрана. Jedina razlika je što se kontejnerski kran kreće po šinama ili korišćenjem pneumatika. Gusenice se kod ovih kranova ne koriste.

2.1. Generatorski režim rada motora kod pogona dizanja

Pogon dizanja kod kranova najčešće je baziran na primeni trofaznog asinhronog motora sa kratkospojenim rotorom koji se napaja iz trofaznog frekvencijskog pretvarača. Pored svih prednosti ovakve koncepcije pogona dizanja, nezaobilazan problem koji se javlja je generatorski režim rada motora pri spuštanju tereta. Uobičajena rešenja su otpornik za kočenje u jednosmernom međukolu frekvencijskog pretvarača ili primena frekvencijskog pretvarača sa mogućnošću rekuperacije energije. Sama primena standardnih frekvencijskih pretvarača narušava kvalitet napajanja u smislu harmonijskih izobličenja, a dodatno, primena otpornika za kočenje može da se smatra energetske neefikasnim rešenjem jer se pri generatorskom režimu rada motora električna energija pretvara u toplotu. Savremeno rešenje, koje prevazilazi navedene probleme, podrazumeva zamenu frekvencijskog pretvarača invertorom i aktivnim mrežnim ispravljačem (eng. Active Front End, skraćeno AFE). Osnovne karakteristike aktivnog mrežnog ispravljača su: oblikovanje ulaznih struja što obezbeđuje veoma nizak sadržaj viših harmonika, regulacija faktora snage i mogućnost rada sa jediničnim faktorom snage, kao i regulacija jednosmernog napona.

Različite topologije veze aktivnog mrežnog ispravljača i invertora prikazane su na slici 2.7.

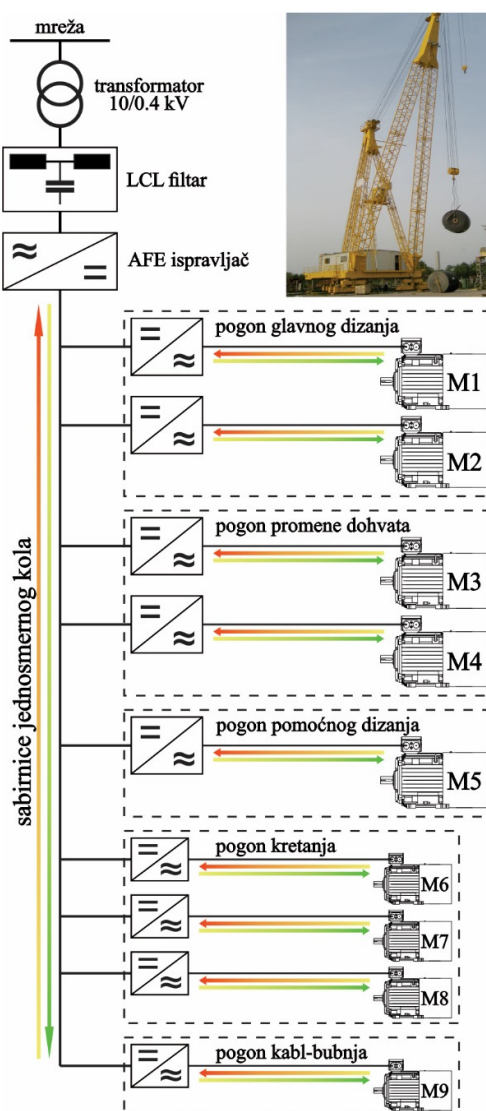


Slika 2.7. Različite topologije veze aktivnog mrežnog ispravljača i invertora

Prosta zamena frekvencijskog pretvarača invertorom i aktivnim mrežnim ispravljačem, gde jedan aktivni mrežni ispravljač napaja jedan invertor (slika 2.7, a)), predstavlja najskuplje investiciono rešenje i primenjuje se samo u izuzetnim slučajevima. Jeftinije rešenje, gde jedan aktivni mrežni ispravljač napaja više invertora (slika 2.7, b)), primenjuje se za veći broj

elektromotornih pogona postrojenja ili za višemotorne pogone. Takođe, više aktivnih mrežnih ispravljača može da radi paralelno (slika 2.7, c)), što se primenjuje kod postrojenja sa redundantnim napajanjem ili pri primeni više aktivnih mrežnih ispravljača manjih snaga od potrebne.

Topologija sa slike 2.7, b), praktično je primenjena na Derik kranu DK004, pri čemu jedan aktivni mrežni ispravljač napaja pet elektromotornih pogona kрана i devet invertora. Principijelna blok šema napajanja elektromotornih pogona Derik kрана DK004, koji je instaliran na otvorenom montažnom placu u RB Kolubara, prikazana je na slici 2.8.



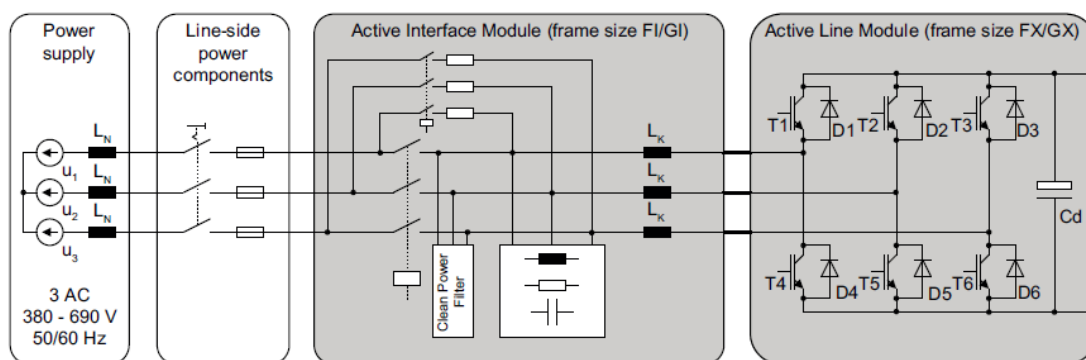
Slika 2.8. Principijelna blok šema napajanja elektromotornih pogona Derik kрана DK004

Nominalne snage motora pojedinih pogona iznose: pogon glavnog dizanja, pogon promene dohvata, pogon pomoćnog dizanja (motori M1 do M5) – 45 kW; pogon kretanja (motori M6 do

M8) – 7.5 kW; pogon kabl-bubnja (motor M9) – 1.5 kW. Samim tim, aktivni mrežni ispravljač napaja elektromotorne pogone čiji motori imaju instalisanu snagu od 249 kW.

Pri projektovanju kрана, a imajući u vidu tehnološke zahteve koje kран mora da ispuni, nametnuo se zaključak da ne postoji potreba da pogoni glavnog dizanja, promene dohvata i pomoćnog dizanja rade istovremeno. U skladu s tim, na upravljačkom nivou navedenih pogona realizovana je blokada jednovremenog rada, čime je maksimalna jednovremena snaga na nivou motora svedena na 114 kW. Imajući u vidu otežane uslove rada pojedinih pogona, gubitke u pripadajućim inverterima i rezervu u snazi, a na osnovu tržišne ponude proizvođača SIEMENS, predviđen je aktivni mrežni ispravljač nominalne snage 160 kW, serije SINAMICS S120. Direktna posledica smanjenja nominalne snage aktivnog mrežnog ispravljača su manji investicioni troškovi izgradnje kрана.

Principijelna blok šema izabranog aktivnog mrežnog ispravljača prikazana je na slici 2.9.



Slika 2.9. Principijelna blok šema aktivnog mrežnog ispravljača nominalne snage 160 kW (slika preuzeta iz [52])

Analizom slike 2.9 može se zaključiti da je sastavni deo aktivnog mrežnog ispravljača *LCL* filter sa otpornikom za prigušenje. Uloga filtra je oblikovanje ulaznih struja, što obezbeđuje veoma nizak sadržaj viših harmonika [53]. Vrednosti parametara *LCL* filtra, preuzete iz aktivnog mrežnog ispravljača softverom “Drive ES – Starter” proizvođača Siemens, date su na slici 2.10.

72	p220[0]	Infeed line filter type, Line filter	[10] AIM F 400 V 132 kW 160 kW (6SL3300-7TE32-6Ax0)
73	p221[0]	Infeed filter capacitance, Line filter	39.00 μF
74	p222[0]	Infeed filter resistance, Line filter	0.30000 ohm
75	p223	Infeed inductance between filter and power unit	0.319 mH
76	p224	Infeed resistance between filter and power unit	0.00000 ohm
77	p225	Infeed inductance between line supply and filter	0.032 mH
78	p226	Infeed resistance between line supply and filter	0.00 ohm

Slika 2.10. Vrednosti parametara *LCL* filtra aktivnog mrežnog ispravljača

U skladu sa projektnim zadatkom i uslovima eksploatacije kрана, mora da bude omogućen generatorski režim rada motora svih pripadajućih pogona i to sa nominalnom snagom (radni režim S1 – trajan pogon). Motori pogona glavnog dizanja, promene dohvata i pomoćnog dizanja u navedeni režim rada ulaze pri spuštanju tereta, odnosno pri spuštanju pokretnog kraka (strele), motori pogona kretanja pri kretanju kрана niz vetar, a motor pogona kabl-bubnja pri odmotavanju kabla.

Pri generatorskom režimu rada bilo kog motora, generisana energija se kroz pripadajući inverter vraća na sabirnice jednosmernog kola pokrivajući sopstvenu potrošnju invertora. Nakon toga, pokriva sopstvenu potrošnju svih ostalih invertora i, eventualno, potrošnju ostalih pogona čiji motori rade u motornom režimu. Ostatak generisane energije, ukoliko postoji, kroz aktivni mrežni ispravljač vraća se u mrežu. Na ovaj način, količina energije vraćene u mrežu, odnosno rekuperacija, svedena je na minimum. U praksi, rekuperacija energije na nivou aktivnog mrežnog ispravljača javlja se samo pri generatorskom režimu rada motora pogona glavnog dizanja ili pogona promene dohvata, i to pri spuštanju tereta samo iznad određenog opterećenja motora. Može se zaključiti da izabrana topologija veze aktivnog mrežnog ispravljača i invertora (slika 2.7, b)), u kombinaciji sa adekvatnim upravljanjem, obezbeđuje minimalne gubitke električne energije pri eksploataciji kрана, a samim tim i veću elektroenergetsku efikasnost, što predstavlja inovaciju već poznatog, ali ne i često primenjivanog industrijskog rešenja.

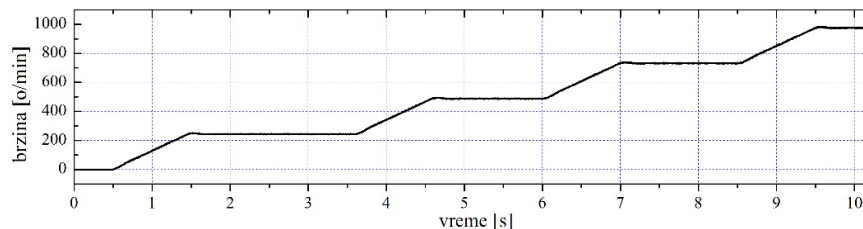
U cilju utvrđivanja performansi predloženog rešenja, nakon puštanja u rad Derik kрана DK004, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina i to posredstvom aktivnog mrežnog ispravljača i invertora pogona glavnog dizanja, a korišćenjem softvera “Drive ES – Starter”, proizvođača Siemens. Na osnovu snimljenih vremenskih zavisnosti, primenom programskog paketa “Origin”, realizovana je harmonijska analiza struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača.

Snimljene su vremenske zavisnosti brzine obrtanja motora, aktivne i reaktivne snage na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, kao i jednosmernog napona na sabirnicama jednosmernog kola, a sa vremenom uzorkovanja od 2.5 ms. Imajući u vidu potrebu za većom rezolucijom i činjenicu da je snimanje ograničeno na 4096 tačaka, vremenske zavisnosti napona i struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača snimljene su nezavisno, a sa vremenom uzorkovanja od 0.25 ms.

Brzina obrtanja motora merena je enkoderom, a preuzeta je iz pripadajućeg invertora. Jednosmerni napon, kao i napon i struja na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača mereni su odgovarajućim sensorima, a preuzeti su iz aktivnog mrežnog ispravljača. Aktivna i reaktivna snaga estimirane su veličine, takođe preuzete iz aktivnog mrežnog ispravljača.

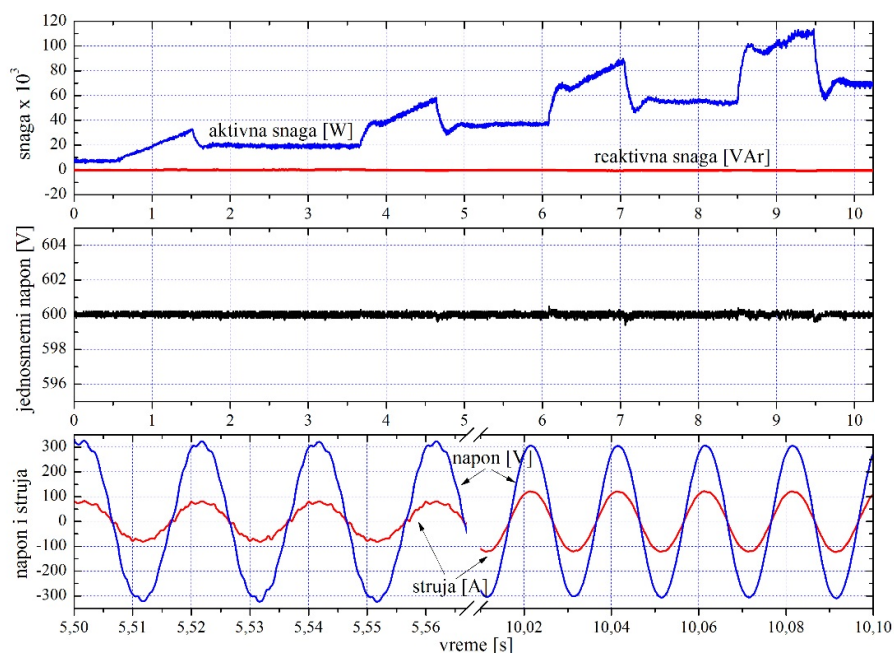
Sve vremenske zavisnosti snimljene su pri opterećenom pogonu glavnog dizanja i to masom od oko 45 t, što predstavlja 3/4 nosivosti. Snimljene su vremenske zavisnosti pri dizanju i pri spuštanju tereta, a sve to pri različitim brzinama: 25 %, 50 %, 75 % i 100 % sinhronne brzine motora, koja iznosi 1000 o/min.

Na slici 2.11 prikazana je vremenska zavisnost brzine obrtanja motora pogona glavnog dizanja, M1, pri dizanju tereta. Skoro identična vremenska zavisnost ima se i za brzinu obrtanja motora M2.



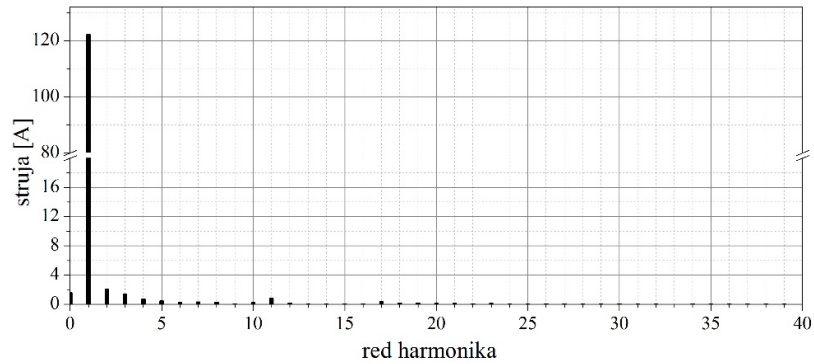
Slika 2.11. Pogon glavnog dizanja, brzina obrtanja motora M1, dizanje tereta

Za slučaj kada pogon glavnog dizanja radi u režimu dizanja tereta, na slici 2.12 prikazane su vremenske zavisnosti aktivne i reaktivne snage na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, jednosmernog napona na sabirnicama jednosmernog kola, kao i napona i struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, snimljene istovremeno sa vremenskom zavisnošću brzine koja je prikazana na slici 2.11.



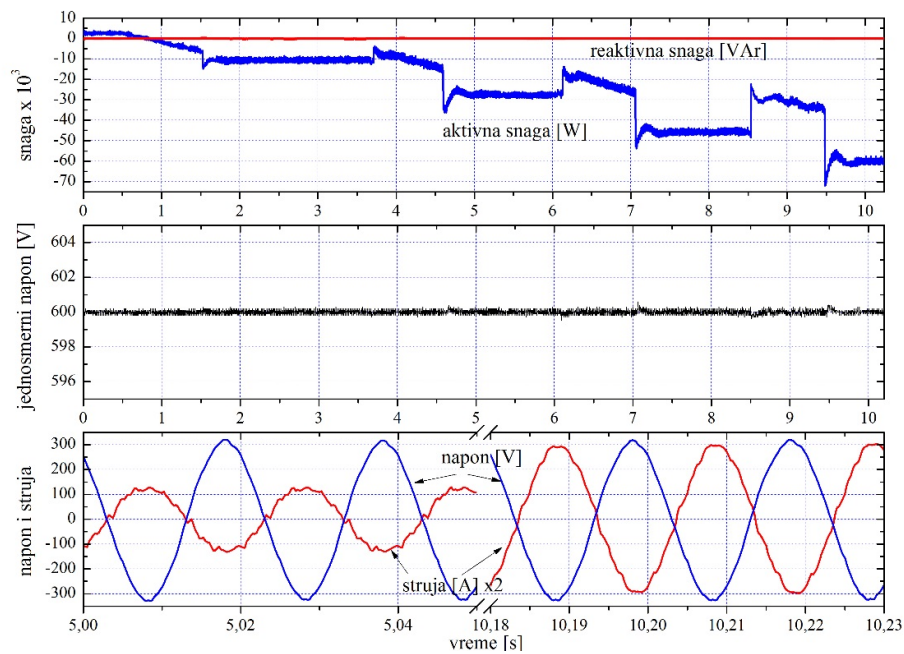
Slika 2.12. Aktivni mrežni ispravljač, vremenske zavisnosti pri dizanju tereta

Na slici 2.13 prikazana je harmonijska analiza struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, a za slučaj kada pogon glavnog dizanja radi u režimu dizanja tereta. Harmonijska analiza realizovana je za jednu periodu talasnog oblika struje sa slike 2.12, i to pri brzini dizanja od 1000 o/min.



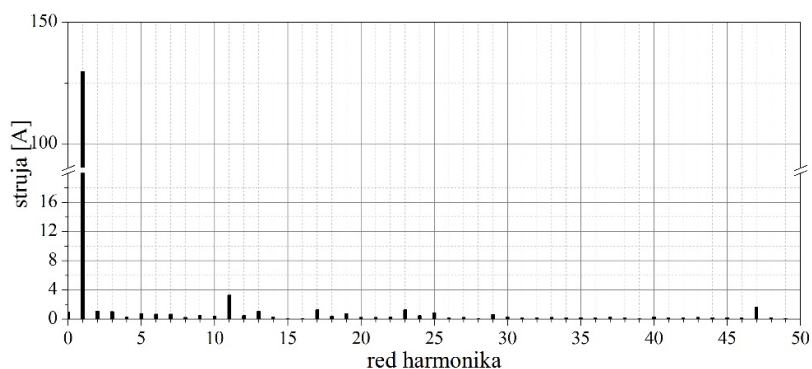
Slika 2.13. Harmonijska analiza struje pri dizanju tereta brzinom od 1000 o/min

Za slučaj kada pogon glavnog dizanja radi u režimu spuštanja tereta, na slici 2.14 prikazane su vremenske zavisnosti aktivne i reaktivne snage na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, jednosmernog napona na sabirnicama jednosmernog kola, kao i napona i struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača. Vremenska zavisnost brzine obrtanja motora pri spuštanju tereta slična je vremenskoj zavisnosti sa slike 2.11, s tim što je brzina negativna.



Slika 2.14. Aktivni mrežni ispravljač, vremenske zavisnosti pri spuštanju tereta

Na slici 2.15 prikazana je harmonijska analiza struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača, a za slučaj kada pogon glavnog dizanja radi u režimu spuštanja tereta. Harmonijska analiza realizovana je za jednu periodu talasnog oblika struje sa slike 2.14, i to pri brzini spuštanja od -1000 o/min.



Slika 2.15. Harmonijska analiza struje pri spuštanju tereta brzinom od -1000 o/min

Analizom slika 2.12 i 2.14 može se zaključiti da reaktivna snaga osciluje u uskim granicama oko nule, što nameće zaključak da je faktor snage blizak jediničnom. Imajući u vidu da je zadata vrednost faktora snage 0.99, jasno je da se ima dobra regulacija faktora snage. Vremenska zavisnost aktivne snage odgovara promeni brzine obrtanja motora pogona glavnog dizanja i pri dizanju i pri spuštanju tereta. Takođe, pri spuštanju tereta aktivna snaga je negativna, što navodi na zaključak da je prisutna rekuperacija energije na nivou aktivnog mrežnog ispravljača. Jednosmerni napon u oba slučaja osciluje u uskim granicama oko 600 V, što, imajući u vidu zadatu vrednost od 600 V, nameće zaključak da postoji dobra regulacija jednosmernog napona. Vremenske zavisnosti napona i struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača bliske su sinusoidalnim, što navodi na zaključak da se ima oblikovanje ulaznih struja i veoma nizak sadržaj viših harmonika. Takođe, pri spuštanju tereta fazni stav između napona i struje približno je jednak 180° električnih, što potvrđuje zaključak o rekuperaciji energije na nivou aktivnog mrežnog ispravljača.

Slike 2.13 i 2.15 pružaju kvantitativnu potvrdu zaključka o veoma niskom sadržaju viših harmonika kod struje na ulazu aktivnog mrežnog ispravljača i pri dizanju i pri spuštanju tereta.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata priloženih na slikama 2.12 do 2.15, a sa stanovišta uticaja aktivnog mrežnog ispravljača na mrežu, nameće se zaključak da se ima dobro oblikovanje ulaznih struja što obezbeđuje veoma nizak sadržaj viših harmonika i dobra regulacija faktora snage, i to i pri dizanju i pri spuštanju tereta, kada se javlja rekuperacija energije na nivou aktivnog

mrežnog ispravljača. Sa stanovišta uticaja aktivnog mrežnog ispravljača na napajanje elektromotornih pogona, prisutna je dobra regulacija jednosmernog napona.

Takođe, na osnovu ranije izložene teorijske analize, jasno je da izabrana topologija veze aktivnog mrežnog ispravljača i invertora, u kombinaciji sa adekvatnim upravljanjem, obezbeđuje minimalne gubitke električne energije pri eksploataciji kрана, a samim tim i veću elektroenergetsku efikasnost. Predložena inovacija, imajući u vidu investicione troškove izgradnje kрана, pre svega je isplativa kod kranova sa značajnom vrednošću maksimalne jednovremene snage, kod kojih su prisutni česti ili relativno dugi generatorski režimi rada motora.

2.2. Tandemski rad kranova

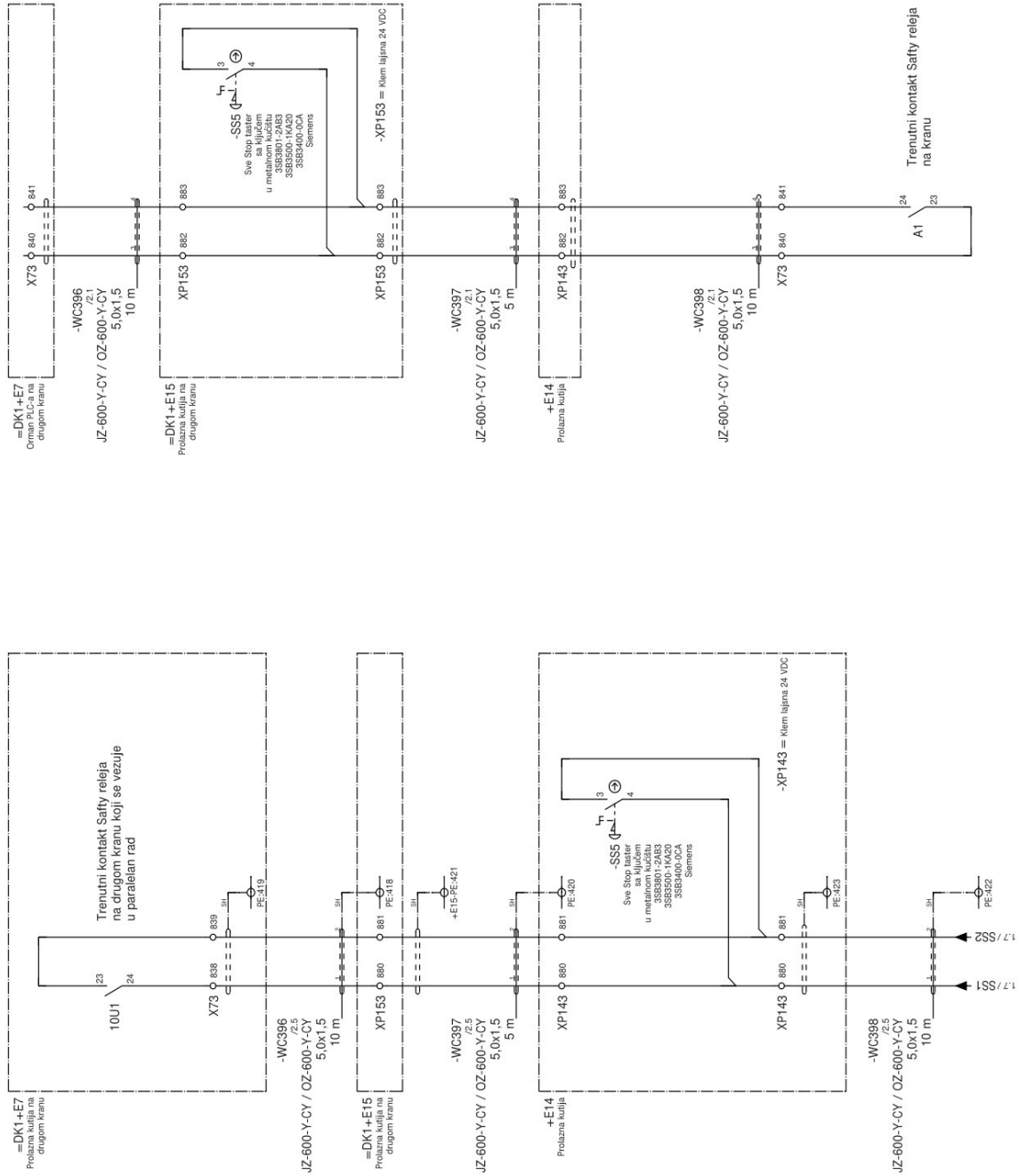
U skladu sa Pravilnikom o tehničkim normativima za dizalice [13], svaki kran na vidnom mestu mora da ima istaknutu fabričku tablicu koja, između ostalog, sadrži nosivost u tonama. Nosivost predstavlja maksimalno dozvoljeno opterećenje pri eksploataciji kрана. Međutim, povremeno može da se javi potreba da kran manipuliše opterećenjem iznad definisane nosivosti. Razlozi za to mogu da budu nove okolnosti pri eksploataciji kрана koje nisu uzete u obzir pri projektovanju, ali i svesno dimenzionisanje kрана za nosivost ispod maksimalno potrebne u cilju smanjenja investicionih troškova izgradnje i troškova eksploatacije. Rešenje navedenog problema predstavlja tandemski (paralelni) rad kranova. Pored povećanja nosivosti, tandemski rad kranova primenjuje se i pri manipulaciji sa geometrijski izrazito nesimetričnim opterećenjima. Razlog je sprečavanje nestabilnosti, a zbog nemogućnosti da se odredi centar gravitacije opterećenja ili nemogućnosti da se opterećenje prihvati blizu centra gravitacije. Sa stanovišta upravljanja, u naučnoj literaturi problem tandemskog rada kranova nije dovoljno obrađivan. Navedenom problemu pažnju posvećuju samo proizvođači kranova, koji nude gotova rešenja.

Klasično rešenje za tandemski rad kranova podrazumeva prisustvo rukovaoca na svakom kranu. Manipulacije opterećenjem realizuju se koordinacijom rukovaoca, a na osnovu međusobne komunikacije i komunikacije sa osobljem koje prati opterećenje. Nedostaci ovog rešenja su potreba za većim brojem rukovaoca, koji mora da bude jednak broju kranova, kao i komunikacija između većeg broja osoba, što može da dovede do zabune i nekoordinisanog rada.

Unapređeno rešenje, koje prevazilazi navedene nedostatke, praktično je primenjeno na montažnom placu u RB Kolubara, gde je realizovan tandemski rad dva pokretna Derik kрана, DK003 i DK004, namenjena za montažu rudarske opreme. U skladu sa zahtevima investitora, unapređenje postojećeg klasičnog rešenja imalo je za cilj da omogući tandemski rad kranova sa jednim rukovaocem. Na taj način, broj rukovaoca je smanjen u odnosu na klasično rešenje, čime je postignuta ušteda u angažovanom osoblju i eliminisana mogućnost nekoordinisanog rada. Naravno, smanjen je i broj osoba u komunikaciji pri manipulacijama opterećenjem, što za posledicu ima manju verovatnoću zabune.

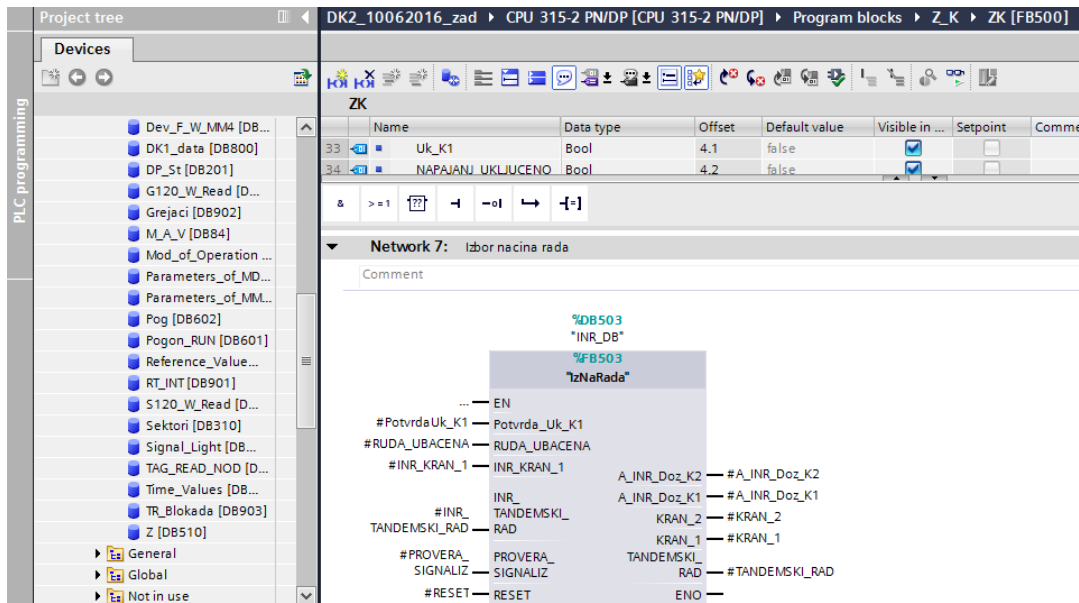
Derik kranovi DK003 i DK004 nosivosti su po 60 t, dok njihova nosivost u tandemskom radu iznosi 100 t. Poseduju istu mašinsku konstrukciju, ali postoji razlika u elektromotornim pogonima i upravljačkim sistemima zbog vremenske distance u izgradnji od 8 godina. Kranovi se kreću po šinama u jednoj osi, a u tandemskom radu međusobni položaj njihovih portala fiksira se

krutom vezom, rudom. Opterećenje se prihvata direktno ili korišćenjem traverze, u zavisnosti od geometrije i mogućnosti prihvata. Imajući u vidu da je pri tandemsom radu kranova potreban jedan rukovalac, a u skladu sa propisima, nezavisni sigurnosni strujni krugovi dva kрана spajaju se u jedinstveni sigurnosni strujni krug. Deo tehničke dokumentacije Derik kрана DK004, koji se odnosi na formiranje jedinstvenog sigurnosnog strujnog kruga pri tandemsom radu kрана, prikazan je na slici 2.16 (u tehničkoj dokumentaciji, Derik kranovi DK003 i DK004 označeni su sa DK1 i DK2, respektivno).



Slika 2.16. Jedinstveni sigurnosni strujni krug pri tandemsom radu kрана DK003 i DK004

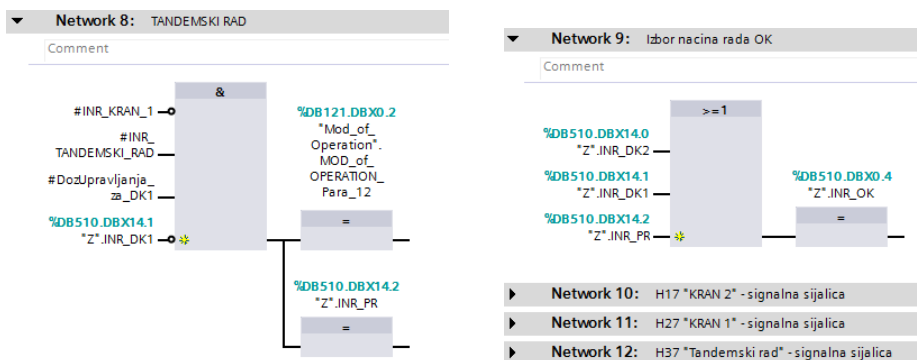
Na upravljačkom nivou oba kрана realizovana je mogućnost davanja komandi iz jedne kabine dizaličara i to svakom kranu nezavisno i paralelno, za oba kрана istovremeno. Takođe, iz jedne kabine dizaličara moguće je praćenje svih relevantnih veličina, vezanih za rad oba kрана. Na slici 2.17 prikazan je PLC funkcijski blok za izbor načina rada komandi u kabini dizaličara Derik kрана DK004, koji predstavlja vodeći (master) kran pri tandemskom radu. Navedenim komandama nezavisno može da se upravlja Derik kranom DK004 (“KРАН_2”) i Derik kranom DK003 (“KРАН_1”), kao i tandemskim radom ova dva kрана (“TANDEMSKI_RAD”). Funkcijski blok za izbor načina rada formiran je korišćenjem softvera “TIA Portal V13” proizvođača Siemens, u kojem je realizovano i programiranje PLC-a Derik kрана DK004.



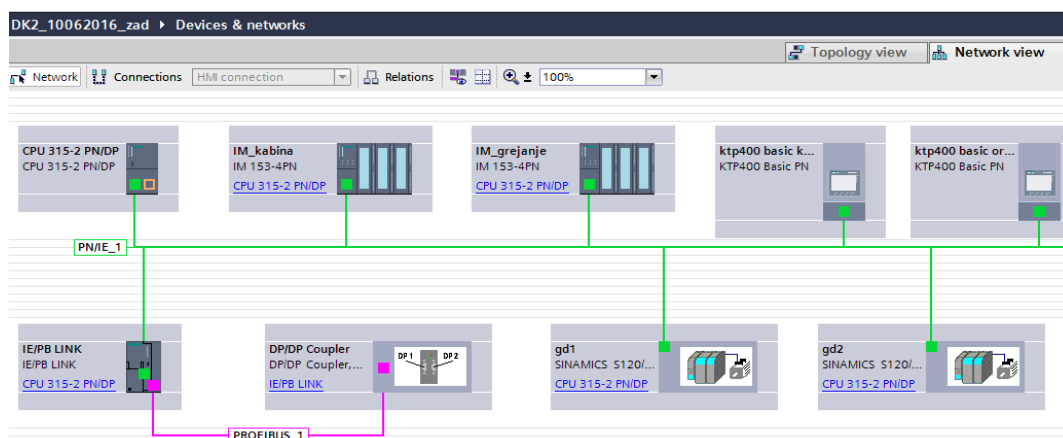
Slika 2.17. Funkcijski blok za izbor načina rada komandi u kabini dizaličara Derik kрана DK004

Programskom linijom 8 PLC funkcijskog bloka za izbor načina rada komandi realizuje se izbor upravljanja pri tandemskom radu kranova. Programaska linija 9 generiše potvrdu da je izbor načina rada komandi uspešan i da može da se nastavi sa radom. Ove dve programske linije prikazane su na slici 2.18. Signalizacija izabranog načina rada komandi daje se u kabini dizaličara odgovarajućim signalnim sijalicama (programske linije 10 do 12).

Razmena podataka između kranova, u skladu sa postojećim stanjem, realizovana je uparivanjem industrijskih komunikacionih mreža PROFIBUS DP i PROFINET. Na slici 2.19 data je topologija komunikacionih mreža Derik kрана DK004, formirana korišćenjem softvera “TIA Portal V13”.

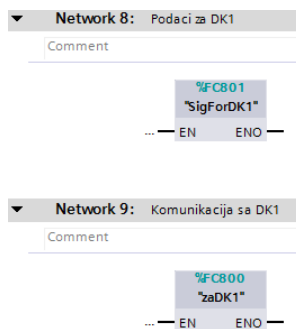


Slika 2.18. Programske linije 8 i 9 funkcijskog bloka za izbor načina rada komandi



Slika 2.19. Topologija komunikacionih mreža Derik kрана DK004

Kod Derik kрана DK004, razmena podataka između kranova realizovana je primenom dve PLC funkcije, prikazane na slici 2.20, koje se pozivaju iz glavnog programa. Funkcija u programskoj liniji 9 realizuje samu razmenu podataka, dok funkcija u programskoj liniji 8 “pakuje” podatke za slanje i “raspakuje” primljene podatke. Na identičan način, ali korišćenjem softvera “SIMATIC STEP 7 V5.4 SP1” proizvođača Siemens, realizovana je razmena podataka kod Derik kрана DK003.



Slika 2.20. Funkcije za razmenu podataka između kranova kod Derik kрана DK004

Na slici 2.21 prikazan je tandemski rad Derik kranova DK003 i DK004, gde se za prihvat opterećenje koristi traverza. Slika je snimljena pri prvom ispitivanju, kada, u skladu sa Pravilnikom o tehničkim normativima za dizalice [13], probni teret iznosi 125 % nosivosti, što je u konkretnom slučaju 125 t.



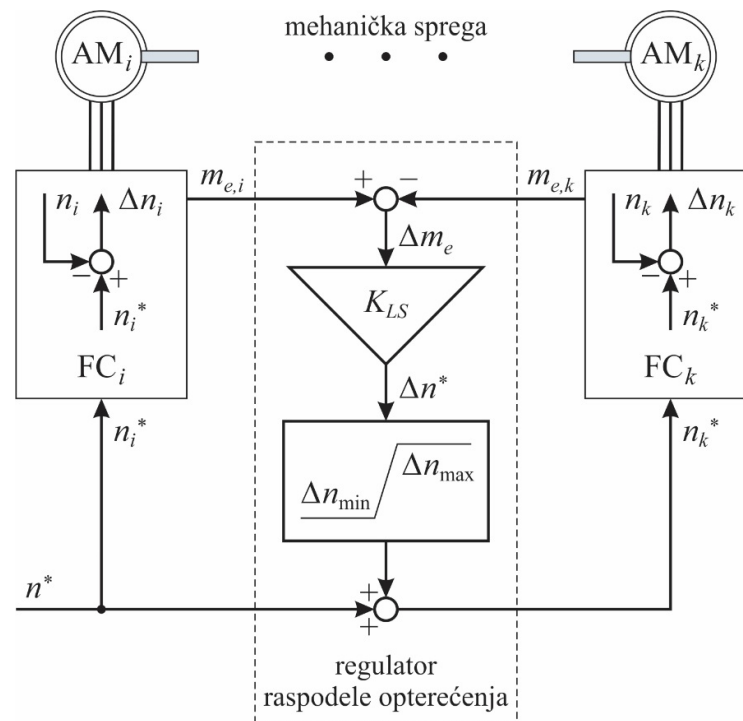
Slika 2.21. Tandemski rad Derik kranova DK003 i DK004

3. Regulacija zakošenja i raspodele opterećenja u regulisanim višemotornim pogonima

3.1. Raspodela opterećenja

Dva ili više motora koji rade zajedno u okviru jednog tehnološkog procesa vrlo često su u mehaničkoj sprezi, direktno preko transmisionih mehanizama ili indirektno preko materijala koji se obrađuje u datom procesu. U tom slučaju, osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred regulisanim višemotornim pogonom jeste da svi motori koji pokreću zajedničko opterećenje dele isto srazmerno nominalnim snagama motora. Imajući to u vidu, veoma je značajno iznalaženje praktičnog rešenja koje na jednostavan način rešava problem ravnomerne raspodele opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu.

Principijelna blok šema za realizaciju raspodele opterećenja između dva mehanički spregnuta asinhrona motora (AM_i i AM_k) koji se napajaju iz frekvenijskih pretvarača (FC_i i FC_k) prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1. Principijelna blok šema za realizaciju raspodele opterećenja

Principijelna blok šema, prikazana na slici 3.1, uvek važi kada su estimirani elektromagnetni momenti motora, $m_{e,i}$ i $m_{e,k}$, dati u relativnim jedinicama, kao i kada su dati u apsolutnim jedinicama, ali samo kod motora istih nominalnih snaga. Kada su estimirani elektromagnetni

momenti motora dati u apsolutnim jedinicama i kada se nominalne snage motora razlikuju, potrebno je da se izvrši normalizacija momenata ili da se jedan moment preskalira. Kod komercijalno dostupnih frekvencijskih pretvarača elektromagnetni moment motora najčešće se izražava u [% x 10], pa principijelna blok šema sa slike 3.1 može direktno da se primeni.

Mehanički spregnuti asinhroni motori pokreću zajedničko opterećenje i regulisani su po brzini obrtanja primenom pripadajućih frekvencijskih pretvarača. Frekvencijski pretvarači rade u režimu po brzini, a korišćenjem sopstvenih regulatora brzine. U zavisnosti od zahtevanih performansi pogona, brzina obrtanja motora, n_i i n_k , može da se estimira ili meri primenom odgovarajućih enkodera.

Regulisani višemotorni pogon upravlja se po brzini i zadata vrednost brzine obrtanja je n^* .

Ravnomerna raspodela opterećenja između motora realizovana je regulatorom raspodele opterećenja, koji se projektuje u PLC sistemu i predstavlja nadređeni regulator regulatoru brzine pratećeg (slave) frekvencijskog pretvarača, FC_k . S obzirom da se od PLC sistema ne zahtevaju visoke performanse, moguće je iskoristiti postojeći PLC za upravljanje tehnološkim procesom.

Princip rada regulatora raspodele opterećenja zasniva se na činjenici da motor sa manjim relativnim opterećenjem treba ubrzati da bi preuzeo deo opterećenja motora sa većim relativnim opterećenjem, odnosno, da motor sa većim relativnim opterećenjem treba usporiti da bi predao deo opterećenja motoru sa manjim relativnim opterećenjem.

Kod algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.1, jednom frekvencijskom pretvaraču (FC_i) prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona, $n_i^* = n^*$. Za drugi frekvencijski pretvarač (FC_k), zadata vrednost brzine obrtanja koriguje se regulatorom raspodele opterećenja, $n_k^* = n^* + \Delta n^*$. Vrednost korekcije, Δn^* , srazmerna je algebarskoj vrednosti razlike estimiranih elektromagnetnih momenata motora, $\Delta m_e = m_{e,i} - m_{e,k}$. Proporcionalno pojačanje regulatora raspodele opterećenja, K_{LS} , može da se sračuna korišćenjem izraza:

$$K_{LS} = \frac{\Delta n_z^*}{\Delta m_{e,d}}, \quad (3.1)$$

gde je Δn_z^* željena vrednost korekcije za datu vrednost razlike elektromagnetnih momenata motora, $\Delta m_{e,d}$.

Da bi se osigurao stabilan rad pogona pri velikim spoljašnjim poremećajima, kao i pri malim brzinama kada estimacija elektromagnetnog momenta u pogonima bez senzora brzine gubi na tačnosti, poželjno je ograničiti vrednost korekcije, Δn^* , limiterom unutar opsega $\Delta n_{\min} \div \Delta n_{\max}$.

U slučaju nedovoljno velike vrednosti proporcionalnog pojačanja regulatora raspodele opterećenja i/ili uskog opsega limitera, a zbog stalno prisutnih i promenjivih spoljašnjih poremećaja, može da se desi da ravnomerna raspodela opterećenja ne može da se realizuje. Sa druge strane, pri isuviše velikom proporcionalnom pojačanju i širokom opsegu limitera, mogu da se jave neželjeno velike oscilacije momenata motora, a samim tim i brzine. U praksi, proporcionalno pojačanje regulatora raspodele opterećenja, K_{LS} , najčešće ima vrednost iz opsega $(0.5 \div 1)$ r.j. Takođe, limiter treba da ograniči vrednost korekcije, Δn^* , na najviše nekoliko procenata od maksimalne zadate vrednosti brzine obrtanja pogona. Navedene veličine treba podesiti eksperimentalno pri puštanju pogona u rad, a u skladu sa željenim performansama.

U odgovarajućem hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone, a koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih nekom od industrijskih komunikacionih mreža, implementacija opisanog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja jednostavna je i ne zahteva dodatni hardver. Eksperimentalnim podešavanjem parametara regulatora raspodele opterećenja mogu se dobiti željene performanse pogona.

3.2. Regulacija zakošenja

Regulisani višemotorni pogoni sa velikim rasponom, koji služe za transport robe i materija, često se sreću u industriji. Konstrukcijski, ovi pogoni se sastoje od dve pokretne noge povezane mostom, što kao celina čini portal, a detaljno su opisani u poglavlju 2. Kod pogona sa velikim rasponom veoma čest praktičan problem jeste pojava zakošenja konstrukcije. Najčešći uzroci zakošenja su geometrijska nesavršenost konstrukcije, elastičnost konstrukcije, proklizavanje jedne strane u odnosu na drugu, neravnomerno opterećenje pojedinih strana zbog položaja tereta, kao i uticaj vetra kod pogona na otvorenom. U skladu s tim, osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred regulisanim višemotornim pogonom sa velikim rasponom jeste sinhrono odnosno centrirano kretanje obe strane. Imajući to u vidu, veoma je značajno iznalaženje praktičnog rešenja koje na jednostavan način rešava problem regulacije zakošenja.

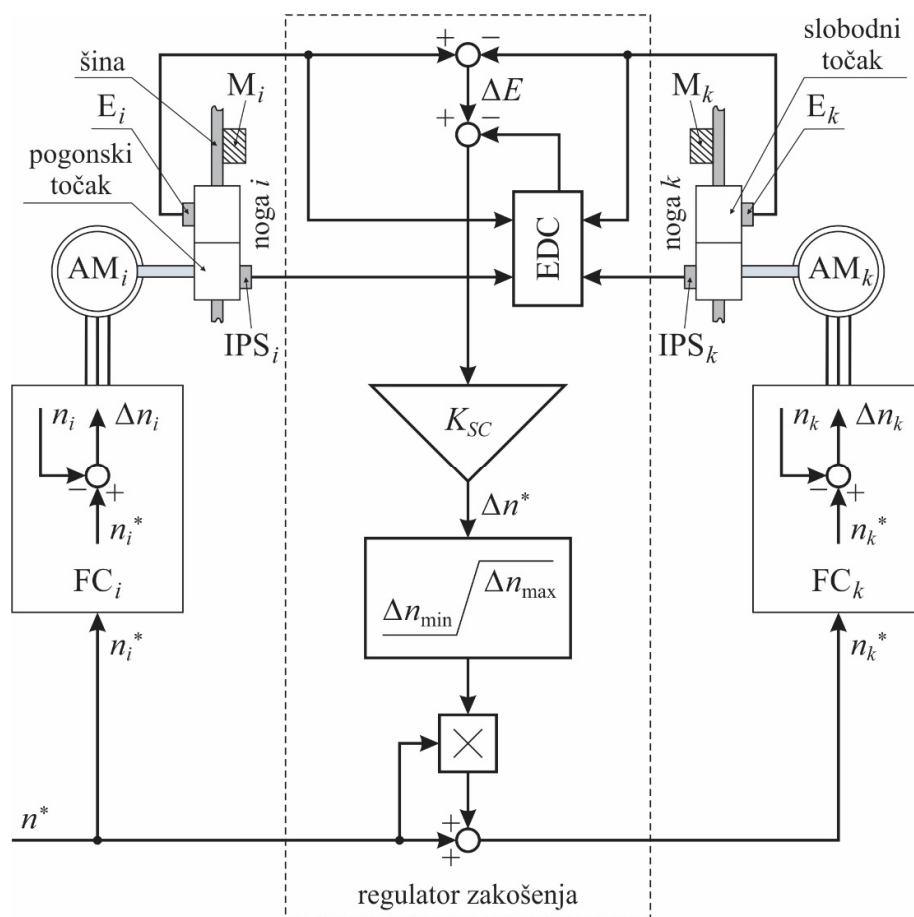
Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja između dva asinhrona motora (AM_i i AM_k) koji se napajaju iz frekvencijskih pretvarača (FC_i i FC_k) prikazana je na slici 3.2. S obzirom da su dve pokretne noge povezane mostom koji predstavlja elastičnu vezu, motori nisu kruto spregnuti.

Elastično spregnuti asinhroni motori pokreću konstrukciju sa velikim rasponom i regulisani su po brzini obrtanja primenom pripadajućih frekvencijskih pretvarača. Frekvencijski pretvarači rade u režimu po brzini, a korišćenjem sopstvenih regulatora brzine. U zavisnosti od zahtevanih performansi pogona, brzina obrtanja motora, n_i i n_k , može da se estimira ili meri primenom odgovarajućih enkodera.

Regulisani višemotorni pogon upravlja se po brzini i zadata vrednost brzine obrtanja je n^* .

Regulacija zakošenja između dve pokretne noge povezane mostom realizovana je regulatorom zakošenja, koji se projektuje u PLC sistemu i predstavlja nadređeni regulator regulatoru brzine pratećeg (slave) frekvencijskog pretvarača, FC_k . S obzirom da se od PLC sistema ne zahtevaju visoke performanse, moguće je iskoristiti postojeći PLC za upravljanje pogonom.

Princip rada regulatora zakošenja zasniva se na činjenici da motor za pogon noge koja zaostaje po poziciji treba ubrzati da bi se zaostajanje smanjilo, odnosno, da motor za pogon noge koja prednjači po poziciji treba usporiti da bi se prednjačenje smanjilo. Na taj način smanjuje se zakošenje.



Slika 3.2. Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja

Kod algoritma za regulaciju zakošenja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.2, jednom frekvencijskom pretvaraču (FC_i) prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona, $n_i^* = n^*$. Za drugi frekvencijski pretvarač (FC_k), zadata vrednost brzine obrtanja koriguje se regulatorom zakošenja, $n_k^* = n^* + \Delta n^* \cdot n^*$. Vrednost korekcije, Δn^* , srazmerna je algebarskoj vrednosti razlike apsolutnih pozicija enkodera, $\Delta E = E_i - E_k$, korigovanoj kompenzatorom spoljašnjih poremećaja, EDC. Vrednost korekcije računa se u relativnim jedinicama, a preračunavanje u apsolutne jedinice realizovano je množenjem sa zatom vrednošću brzine obrtanja pogona, $\Delta n^* \cdot n^*$. Proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja, K_{SC} , može da se sračuna korišćenjem izraza:

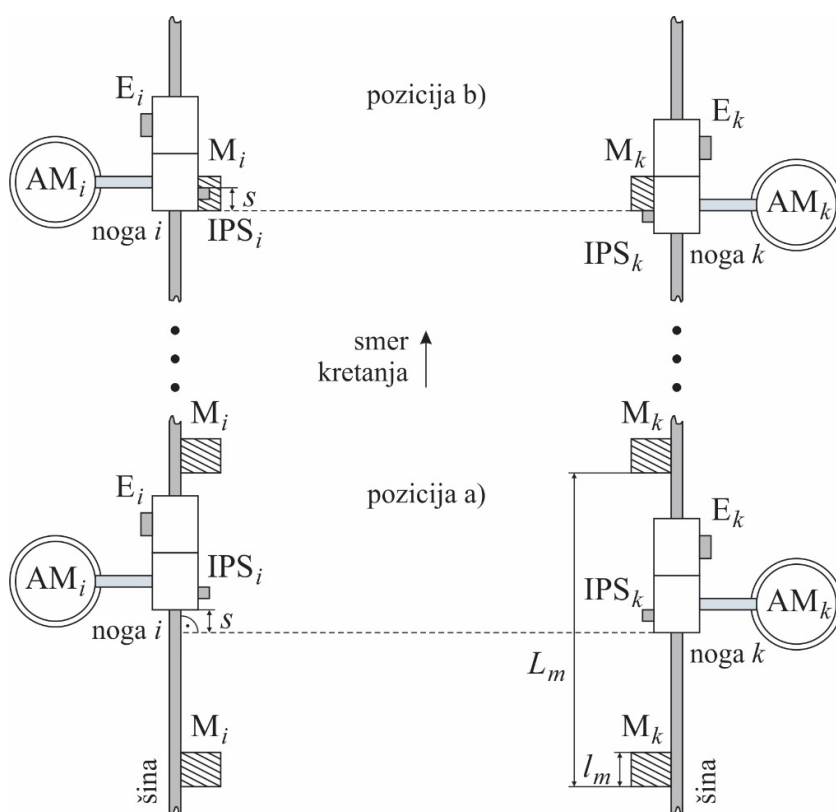
$$K_{SC} = \frac{\Delta n_z^*}{\Delta E_d}, \quad (3.2)$$

gde je Δn_z^* željena vrednost korekcije za datu vrednost razlike apsolutnih pozicija enkodera, ΔE_d .

Da bi se osigurao stabilan rad pogona pri velikim spoljašnjim poremećajima, poželjno je ograničiti vrednost korekcije, Δn^* , limiterom unutar opsega $\Delta n_{\min} \div \Delta n_{\max}$.

Razlika apsolutnih pozicija enkodera, ΔE , može da odstupa od stvarne vrednosti zakošenja iz više razloga, kao što su: razlika u obimima točkova na kojima su montirani enkoderi, proklizavanje tih točkova, razlika u zazorima kod pripadajućih reduktora itd. Kompenzator spoljašnjih poremećaja, EDC, uvažava i kompenzuje sve spoljašnje uticaje na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera merenjem stvarnog zakošenja kada su induktivni davači, IPS_i i IPS_k , iznad pripadajućih markera, M_i i M_k , montiranih simetrično duž kranske staze. Proklizavanje pogonskih točkova, kao najveći spoljašnji poremećaj, može da se eliminiše montažom enkodera na slobodnim točkovima, kao što je i prikazano na slici 3.2.

Princip rada kompenzatora spoljašnjih poremećaja ilustrovan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Ilustracija principa rada kompenzatora spoljašnjih poremećaja

Pozicija a) na slici 3.3 ilustruje regulisani višemotorni pogon sa velikim rasponom čija je konstrukcija zakošena za vrednost s . Vrednost zakošenja, s , predstavlja rastojanje između referentne tačke konstrukcije sa strane motora AM_i i normale na pravac kretanja, povučene iz referentne tačke konstrukcije sa strane motora AM_k .

Pozicija b) na slici 3.3 ilustruje princip rada kompenzatora spoljašnjih poremećaja. Stvarna vrednost zakošenja konstrukcije, s , meri se enkoderima, a kao pređeno rastojanje prvoaktiviranog

induktivnog davača preko pripadajućeg markera, sve do trenutka aktiviranja drugog induktivnog davača. Izlaz iz kompenzatora spoljašnjih poremećaja, odnosno vrednost kompenzacije, je razlika razlike apsolutnih pozicija enkodera i stvarne vrednosti zakošenja, $EDC = \Delta E - s$, a odgovara uticaju spoljašnjih poremećaja na zakošenje konstrukcije. Na ovaj način, pri svakom prelasku preko markera, eliminiše se uticaj svih spoljašnjih poremećaja, akumuliranih između dva para markera.

Za svaku konstrukciju sa velikim rasponom poznata je vrednost kritičnog zakošenja, s_{kr} , koje može da naruši njenu stabilnost. Regulator zakošenja se projektuje prema maksimalno dozvoljenom zakošenju, s_{doz} , koje mora da bude manje od kritičnog zakošenja, $s_{doz} < s_{kr}$. U zavisnosti od tehničkih zahteva, vrednost maksimalno dozvoljenog zakošenja u praksi treba usvojiti iz opsega $(0.4 \div 0.8) s_{kr}$.

Dužina svih markera duž kranske staze treba da je ista i jednaka maksimalno dozvoljenom zakošenju, $l_m = s_{doz}$, da bi bila moguća kontrola zakošenja na način detaljno objašnjen u poglavlju 3.2.1.

Rastojanje između svaka dva para markera duž kranske staze, L_m , mora da bude takvo da pri kretanju pogona između markera spoljašnji uticaji na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera prouzrokuju zakošenje konstrukcije manje od maksimalno dozvoljenog zakošenja. Neka se pogon kreće konstantnom linijskom brzinom v . Rastojanje između markera preći će za vreme:

$$t_m = \frac{L_m}{v}. \quad (3.3)$$

Takođe, neka je pri kretanju pogona, usled spoljašnjih poremećaja (razlika u obimima točkova na kojima su montirani enkodери, proklizavanje tih točkova, razlika u zazorima kod pripadajućih reduktora itd.), maksimalno očekivana razlika između linijskih brzina noge i i noge k pogona Δv . Da bi pri kretanju pogona između markera spoljašnji uticaji na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera prouzrokovali zakošenje konstrukcije manje od maksimalno dozvoljenog zakošenja mora da važi:

$$t_m \leq \frac{s_{doz}}{\Delta v}. \quad (3.4)$$

Zamenom izraza 3.3 u 3.4, dobija se:

$$\frac{L_m}{v} \leq \frac{s_{doz}}{\Delta v}. \quad (3.5)$$

Rastojanje između svaka dva para markera, L_m , izraženo iz jednačine 3.5, iznosi:

$$L_m \leq \frac{s_{doz}}{\Delta v/v}. \quad (3.6)$$

Konačno, izraz za proračun rastojanja između svaka dva para markera, L_m , može da se napiše na sledeći način:

$$L_m \leq \frac{s_{doz}}{\Delta v\%} \cdot 100 \% , \quad (3.7)$$

gde je $\Delta v\%$ maksimalno očekivana razlika između linijskih brzina noge i i noge k pogona, izražena u procentima.

Broj para markera, N_m , za kransku stazu dužine L , može da se sračuna korišćenjem sledećeg izraza:

$$N_m \geq \frac{L}{L_m}. \quad (3.8)$$

U praksi, maksimalno očekivana razlika između linijskih brzina noge i i noge k pogona, $\Delta v\%$, iznosi najviše nekoliko procenata. Pri usvajanju ove vrednosti treba voditi računa o činjenici da je veća vrednost na račun sigurnosti, ali to povećava broj markera pa treba naći kompromisno rešenje.

Da bi se osigurao stabilan rad pogona pri velikim spoljašnjim poremećajima, poželjno je ograničiti vrednost korekcije, Δn^* , limiterom unutar opsega $\Delta n_{\min} \div \Delta n_{\max}$, pri čemu važi $\Delta n_{\min} = -\Delta n_{\max}$.

Granice limitera treba usvojiti pod pretpostavkom nepravilnog rada regulacije zakošenja (npr. otkaz jednog enkodera), a uz uslov da se maksimalno dozvoljeno zakošenje, s_{doz} , dostiže za zadato vreme, t_z . U slučaju nepravilnog rada regulacije zakošenja najgori slučaj je da limiter radi sa graničnom vrednošću, npr. Δn_{\max} . Tada se ima maksimalna razlika između linijskih brzina noge i i noge k pogona, Δv_{\max} , koja iznosi:

$$\Delta v_{\max} = \Delta n_{\max} \cdot \frac{1}{i_p} \cdot \frac{\pi}{60} \cdot D_p , \quad (3.9)$$

gde su: i_p - prenosni odnos reduktora pogonskog točka,

D_p - prečnik pogonskog točka.

Pod napred navedenim uslovima važi:

$$\Delta v_{\max} = \frac{s_{doz}}{t_z}. \quad (3.10)$$

Zamenom izraza 3.9 u 3.10, dobija se:

$$\Delta n_{\max} \cdot \frac{1}{I_p} \cdot \frac{\pi}{60} \cdot D_p = \frac{s_{doz}}{t_z} . \quad (3.11)$$

Granična vrednost limitera, Δn_{\max} , izražena iz jednačine 3.11 iznosi:

$$\Delta n_{\max} = I_p \cdot \frac{60}{\pi \cdot D_p} \cdot \frac{s_{doz}}{t_z} . \quad (3.12)$$

Konačno, izraz za proračun granične vrednosti limitera, Δn_{\max} , u procentima od maksimalne zadate vrednosti brzine obrtanja pogona, n_{\max}^* , može da se napiše na sledeći način:

$$\Delta n_{\max, \%} = \frac{1}{n_{\max}^*} \cdot I_p \cdot \frac{60}{\pi \cdot D_p} \cdot \frac{s_{doz}}{t_z} \cdot 100 \% . \quad (3.13)$$

Zadato vreme, t_z , usvaja se u zavisnosti od zahtevanih performansi pogona. Pritom, treba voditi računa o činjenici da manja vrednost obezbeđuje širi opseg limitera i brži odziv regulatora zakošenja, ali može da prouzrokuje nestabilnost regulacije. Tipična granična vrednost limitera je u opsegu (5÷15) %.

Proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja, K_{SC} , ako se usvoji da je željena vrednost korekcije jednaka graničnoj vrednosti limitera u relativnim jedinicama, $\Delta n_z^* = \Delta n_{\max, \%} / 100 \%$, a za datu vrednost razlike apsolutnih pozicija enkodera koja odgovara pokazivanju enkodera za pređeni put u dužini maksimalno dozvoljeng zakošenja, $\Delta E_d = E_{p, doz}$, može da se sračuna korišćenjem izraza:

$$K_{SC} = \frac{\Delta n_{\max, \%}}{E_{p, doz}} \cdot \frac{1}{100 \%} . \quad (3.14)$$

Pokazivanje enkodera za pređeni put u dužini maksimalno dozvoljeng zakošenja, $E_{p, doz}$, iznosi:

$$E_{p, doz} = E_{p, 1m} \cdot s_{doz} , \quad (3.15)$$

gde je $E_{p, 1m}$ pokazivanje enkodera po metru pređenog puta.

Pokazivanje enkodera po metru pređenog puta, $E_{p, 1m}$, može da se sračuna na način:

$$E_{p, 1m} = E_{p, rev} \cdot I_{fw} \cdot \frac{1}{\pi \cdot D_{fw}} , \quad (3.16)$$

gde su: $E_{p, rev}$ - priraštaj pozicije enkodera po obrtaju,

I_{fw} - prenosni odnos reduktora slobodnog točka,

D_{fw} - prečnik slobodnog točka.

Konačno, za proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja, K_{SC} , zamenom izraza 3.13, 3.15 i 3.16 u izraz 3.14, dobija se:

$$K_{SC} = \frac{1}{n_{\max}^*} \cdot \frac{I_p}{I_{fw}} \cdot \frac{D_{fw}}{D_p} \cdot \frac{60}{t_z} \cdot \frac{1}{E_{p,rev}} \quad (3.17)$$

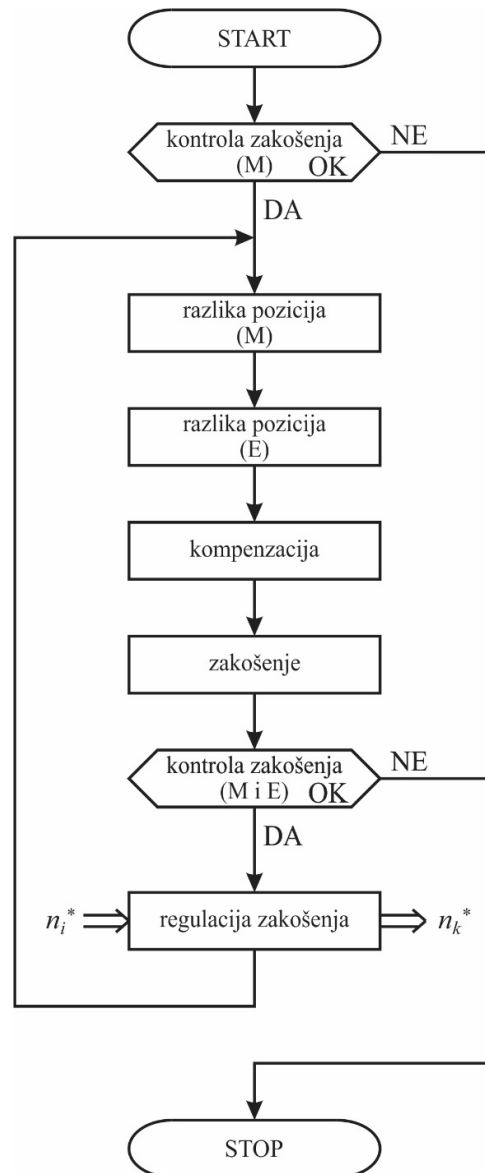
Projektovani regulator zakošenja treba proveriti eksperimentalno pri puštanju pogona u rad, a u skladu sa željenim performansama.

U odgovarajućem hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone, a koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih nekom od industrijskih komunikacionih mreža, implementacija predloženog algoritma za regulaciju zakošenja je jednostavna, a uz minimalne hardverske dodatke. Neophodan dodatni hardver čine dva apsolutna enkodera i dva induktivna davača sa odgovarajućim markerima, čiji se broj dobija proračunom. Projektovanjem regulatora zakošenja na opisan način, uz eksperimentalnu proveru, mogu se dobiti željene performanse pogona.

Napomena: apsolutni enkoderi treba da budu višeobrtni i njihova rezolucija treba da omogući mapiranje cele kranske staze, uz odgovarajući stepen sigurnosti.

3.2.1. Algoritam PLC programa za regulator zakošenja

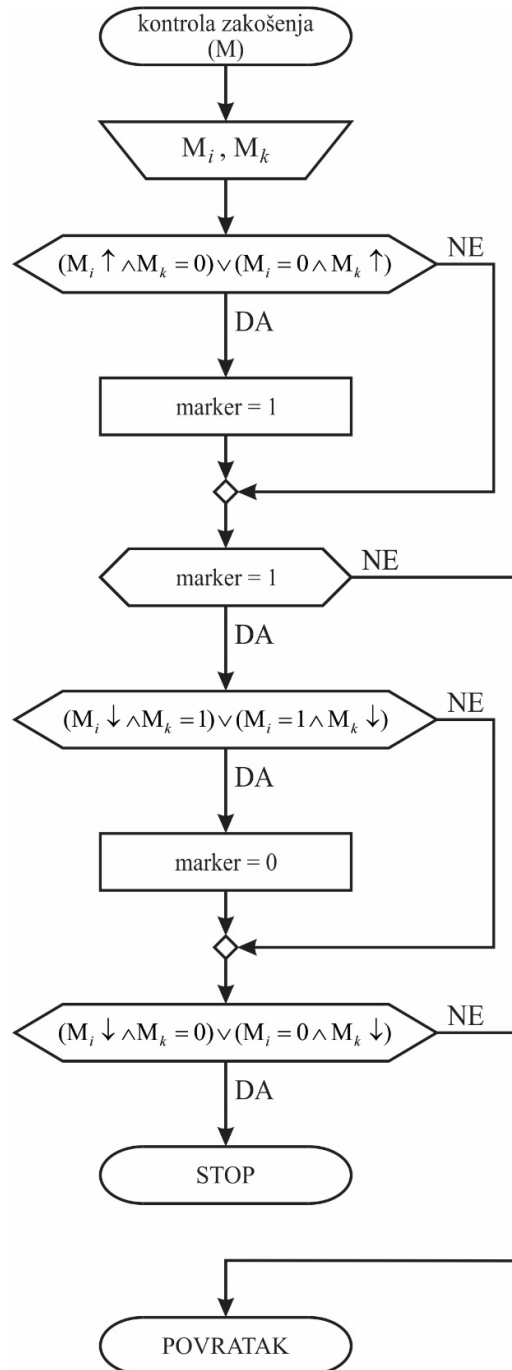
Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja prikazana je na slici 3.2. Regulacija zakošenja realizovana je regulatorom zakošenja, koji se projektuje u PLC sistemu, pisanjem odgovarajućeg programskog koda. Algoritam PLC programa za predloženi regulator zakošenja prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. Algoritam PLC programa za predloženi regulator zakošenja

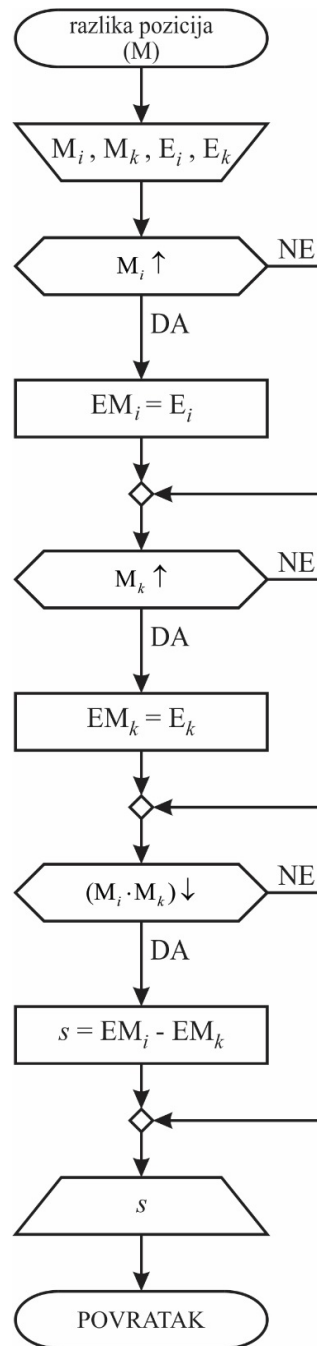
Algoritam PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M)” prikazan je na slici 3.5. Ovde je iskorišćena činjenica da je dužina svih markera duž kranske staze ista i jednaka maksimalno

dozvoljenom zakošenju, $l_m = s_{doz}$. Blok “kontrola zakošenja (M)” na osnovu informacija sa induktivnih davača, a dobijenih pri prelasku preko markera, kontroliše zakošenje i u slučaju kada je zakošenje veće od dužine markera daje signal za blokadu rada pogona. Kontrola zakošenja ovim blokom nezavisna je od funkcionalnosti enkodera i od svih spoljašnjih poremećaja, a aktivna je pri prelasku pogona preko markera.



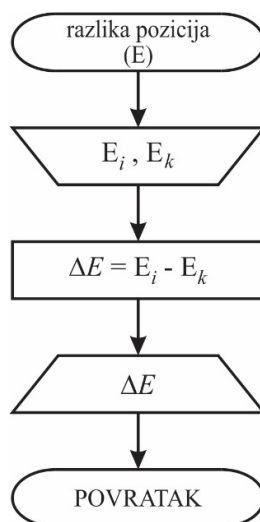
Slika 3.5. Algoritam PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M)”

Algoritam PLC programa za blok “razlika pozicija (M)” prikazan je na slici 3.6. Ovaj blok meri razliku pozicija noge i i noge k pogona, odnosno stvarnu vrednost zakošenja konstrukcije, s , a kao razliku apsolutnih pozicija dva enkodera u trenutka aktiviranja pripadajućih induktivnih davača nailaskom na markere. Stvarna vrednost zakošenja konstrukcije, s , uvažava se kada induktivni davači postanu neaktivni, odnosno kada pogon pređe preko markera.



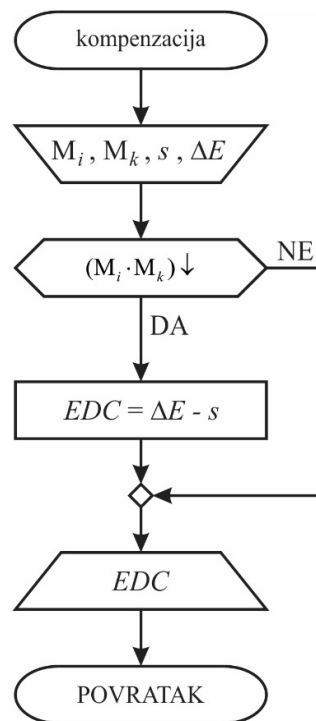
Slika 3.6. Algoritam PLC programa za blok “razlika pozicija (M)”

Algoritam PLC programa za blok “razlika pozicija (E)” prikazan je na slici 3.7. Ovaj blok meri razliku apsolutnih pozicija dva enkodera, ΔE , montiranih na slobodnim točkovima noge i i noge k pogona, i to u svakom procesorskom ciklusu.



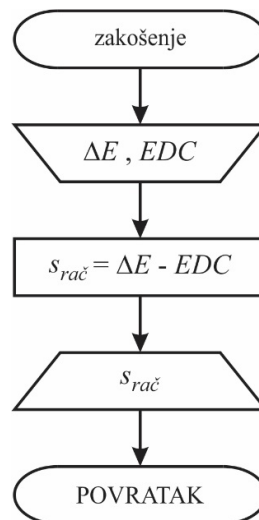
Slika 3.7. Algoritam PLC programa za blok “razlika pozicija (E)”

Algoritam PLC programa za blok “kompenzacija” prikazan je na slici 3.8. Ovaj blok računa vrednost kompenzacije kao razliku razlike apsolutnih pozicija dva enkodera i stvarne vrednosti zakošenja, $EDC = \Delta E - s$. Kompenzacija, EDC , računa se kada induktivni davači postanu neaktivni, odnosno kada pogon pređe preko markera.



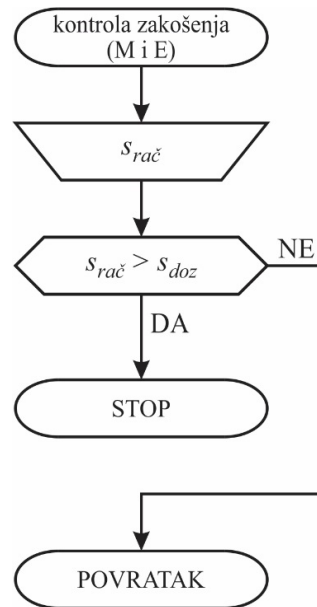
Slika 3.8. Algoritam PLC programa za blok “kompensacija”

Algoritam PLC programa za blok “zakošenje” prikazan je na slici 3.9. Ovaj blok računa vrednost zakošenja kao razliku razlike apsolutnih pozicija dva enkodera i kompenzacije, $s_{rač} = \Delta E - EDC$, i to u svakom procesorskom ciklusu. Sračunata vrednost zakošenja jednaka je stvarnom zakošenju, $s_{rač} = s$, kada pogon pređe preko markera, odnosno kada se izvrši kompenzacija. Između dva proračuna kompenzacije sračunata vrednost zakošenja može da odstupa od stvarne vrednosti zbog uticaja spoljašnjih poremećaja.



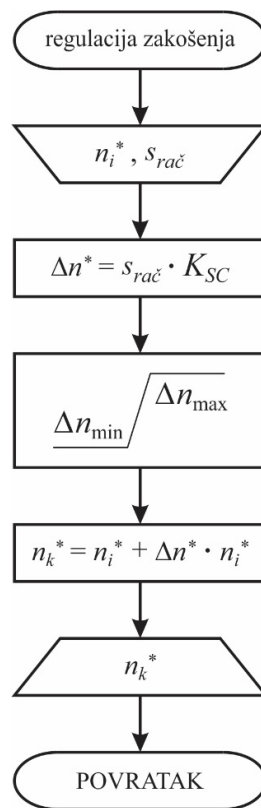
Slika 3.9. Algoritam PLC programa za blok “zakošenje”

Algoritam PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M i E)” prikazan je na slici 3.10. Ovaj blok kontroliše zakošenje poređenjem sračunate vrednosti zakošenja i maksimalno dozvoljenog zakošenja, i to u svakom procesorskom ciklusu. U slučaju kada je sračunato zakošenje veće od maksimalno dozvoljenog zakošenja, $s_{rač} > s_{doz}$, blok daje signal za blokadu rada pogona.



Slika 3.10. Algoritam PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M i E)”

Algoritam PLC programa za blok “regulacija zakošenja” prikazan je na slici 3.11. Ovaj blok, na osnovu zadate vrednosti brzine obrtanja jednog frekvencijskog pretvarača, n_i^* , i sračunate vrednosti zakošenja, $s_{rač}$, računa zadatu vrednost brzine obrtanja drugog frekvencijskog pretvarača, n_k^* , a u cilju regulacije zakošenja, i to u svakom procesorskom ciklusu. Vrednost korekcije, $\Delta n^* = s_{rač} \cdot K_{SC}$, ograničena je limiterom unutar opsega $\Delta n_{min} \div \Delta n_{max}$, a da bi se osigurao stabilan rad pogona pri velikim spoljašnjim poremećajima. Zadatu vrednost brzine obrtanja drugog frekvencijskog pretvarača u apsolutnim jedinicama iznosi $n_k^* = n_i^* + \Delta n^* \cdot n_i^*$.



Slika 3.11. Algoritam PLC programa za blok “regulacija zakošenja”

Predloženi algoritam PLC programa za regulator zakošenja, pre svega ima funkciju da reguliše zakošenje kod regulisanih višemotornih pogona sa velikim rasponom. Osim toga, predloženi algoritam vrši i kontrolu zakošenja, i to na dva nezavisna načina. Ovim je, uz projektovanje regulatora zakošenja na ranije opisan način, osigurano bezbedno kretanje pogona sa velikim rasponom.

3.3. Praktična realizacija raspodele opterećenja i regulacije zakošenja u regulisanim višemotornim pogonima inženjerskog objekta Pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta

Pretovarni most instaliran je na otvorenom skladištu šećerne repe u Fabrici šećera TE-TO Senta (slika 3.12). Pre svega, namenjen je za pretovar šećerne repe.



Slika 3.12. Pretovarni most na otvorenom skladištu šećerne repe u Fabrici šećera TE-TO Senta

Pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta poseduje sledeće pogone:

- Pogon kretanja mosta: maksimalna brzina kretanja 8 m/min, pokretanje 4x3fAM snage 5.5 kW, rastojanje između krute i pendel noge 64.5 m, maksimalna brzina vetra pri kojoj je dozvoljeno kretanje 25 m/s, konstrukcija mosta rešetkasta.
- Pogon kretanja kolica (pogon mačke): maksimalna brzina kretanja 12 m/min, pokretanje 4x3fAM snage 1.1 kW, rastojanje između točkova 3 m.
- Pogon kose trake: maksimalna brzina kretanja 2 m/s, pokretanje 3fAM snage 30 kW, kapacitet 500 t/h šećerne repe.
- Pogon trake mosta: maksimalna brzina kretanja 2 m/s, pokretanje 3fAM snage 30 kW, kapacitet 500 t/h šećerne repe.
- Pogon trake leptira: maksimalna brzina kretanja 2 m/s, pokretanje 2x3fAM snage 11 kW, kapacitet 500 t/h šećerne repe.
- Pogon dizanja leptira: visina dizanja 18 m, pokretanje 3fAM snage 3 kW.

- Pogon kabl-bubnja: dužina kranske staze 300 m sa priključnim mestom na sredini, pokretanje 2 x momentni motor snage 1.1 kW.
- Pogon sidrenja: uklještenje za šinu u dve tačke kleštima na električni i mehanički pogon, pokretanje 2x3fAM snage 1.1 kW.

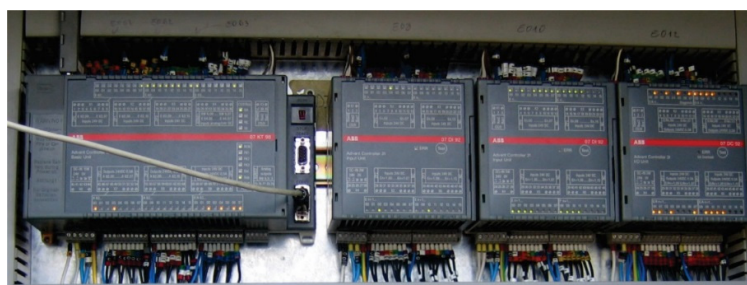
Instalisana snaga pretovarnog mosta je 130.8 kW, dok maksimalna jednovremena snaga iznosi 117.6 kW. Napajanje pretovarnog mosta je kablom 4x95 mm².

Za pokretanje svih pogona pretovarnog mosta, izuzev pogona kabl-bubnja, primenjeni su odgovarajući frekvencijski pretvarači (npr. slika 3.13), a za upravljanje radom celog pretovarnog mosta iskorišćen je jedan PLC adekvatnih performansi (slika 3.14).



Slika 3.13. Frekvencijski pretvarači na pretovarnom mostu za pokretanje:

a) pogona kretanja kolica (pogona mačke), b) pogona kretanja mosta



Slika 3.14. PLC sistem na pretovarnom mostu

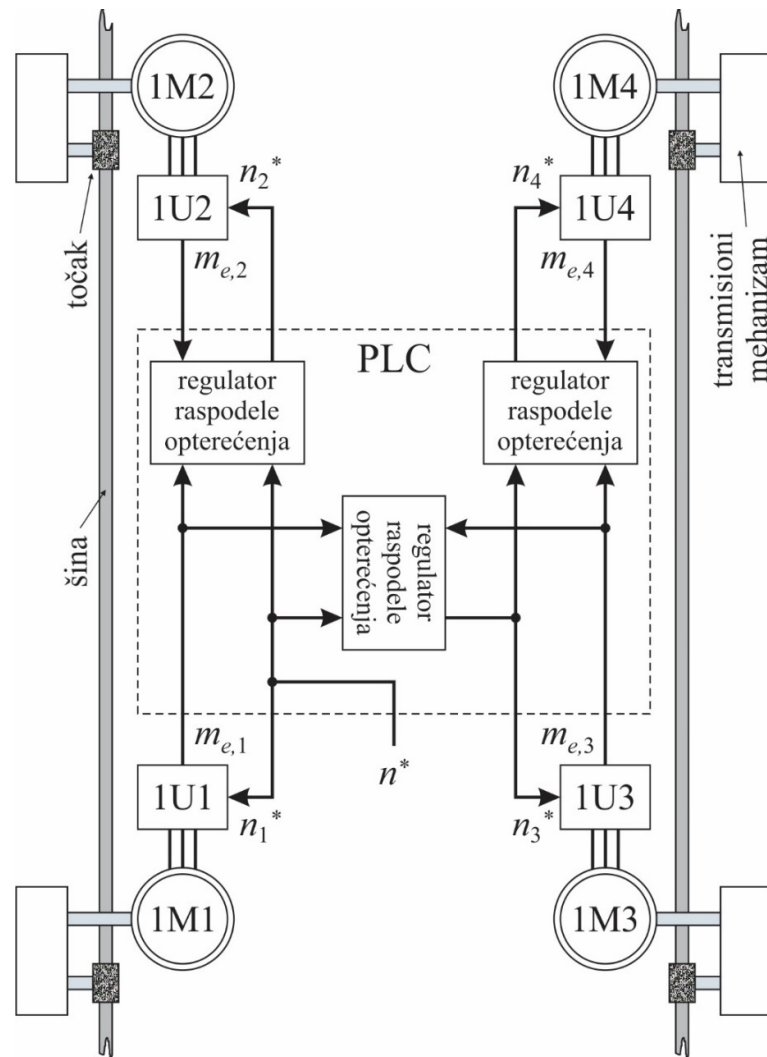
Pogon kretanja kolica (pogon mačke) je regulisani višemotorni pogon za čije se pokretanje koriste četiri trofazna asinhrona motora, 1M1 do 1M4 (slika 3.15), napajana iz pripadajućih frekvencijskih pretvarača, 1U1 do 1U4 (slika 3.13, a)). Za upravljanje radom pogona kretanja kolica iskorišćen je PLC sistem, koji upravlja radom celog pretovarnog mosta (slika 3.14).



Slika 3.15. Pogon kretanja kolica (pogon mačke) – motori 1M1 do 1M4

Motori 1M1 do 1M4 su u mehaničkoj sprezi i to direktno preko transmisionih mehanizama, točkova, šina i krute konstrukcije kolica. U skladu sa ranijom analizom, osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred ovakvim regulisanim višemotornim pogonom jeste da svi motori dele opterećenje srazmerno svojim nominalnim snagama. U konkretnom slučaju motori su istih nominalnih snaga (1.1 kW), pa se navedeni osnovni tehnički zahtev svodi na podelu opterećenja između motora na jednake delove. Imajući to u vidu, a u cilju ravnomerne raspodele opterećenja između motora, u algoritam upravljanja radom pogona kretanja kolica implementirana su tri regulatora raspodele opterećenja.

Principijelna blok šema za realizaciju raspodele opterećenja u pogonu kretanja kolica između četiri mehanički spregnuta asinhrona motora (1M1 do 1M4) koji se napajaju iz frekvencijskih pretvarača (1U1 do 1U4) prikazana je na slici 3.16.



Slika 3.16. Principijelna blok šema za realizaciju raspodele opterećenja – pogon kretanja kolica

Mehanički spregnuti asinhroni motori 1M1 do 1M4 pokreću zajedničko opterećenje, kolica (mačku), i regulisani su po brzini obrtanja primenom pripadajućih frekvencijskih pretvarača 1U1 do 1U4. Frekvencijski pretvarači rade u režimu po brzini, a korišćenjem sopstvenih regulatora brzine. S obzirom da se ne zahtevaju visoke performanse pogona, brzina obrtanja motora se estimira.

Regulisani višemotorni pogon kretanja kolica upravlja se po brzini i zadata vrednost brzine obrtanja je n^* .

Ravnomerna raspodela opterećenja između motora realizovana je regulatorima raspodele opterećenja, koji su projektovani u PLC sistemu. S obzirom da se od PLC sistema ne zahtevaju visoke performanse, iskorišćen je postojeći PLC koji upravlja radom celog pretovarnog mosta.

Ravnomerna raspodela opterećenja između motora koji pokreću točkove na istoj šini obezbeđena je regulatorima raspodele opterećenja između frekvencijskih pretvarača 1U1 i 1U2, odnosno 1U3 i 1U4. Ravnomerna raspodela opterećenja između dve strane kolica obezbeđena je regulatorom raspodele opterećenja između frekvencijskih pretvarača 1U1 i 1U3. Na opisan način, u cilju ravnomerne raspodele opterećenja između četiri motora pogona kretanja kolica, primenjena su tri regulatora raspodele opterećenja.

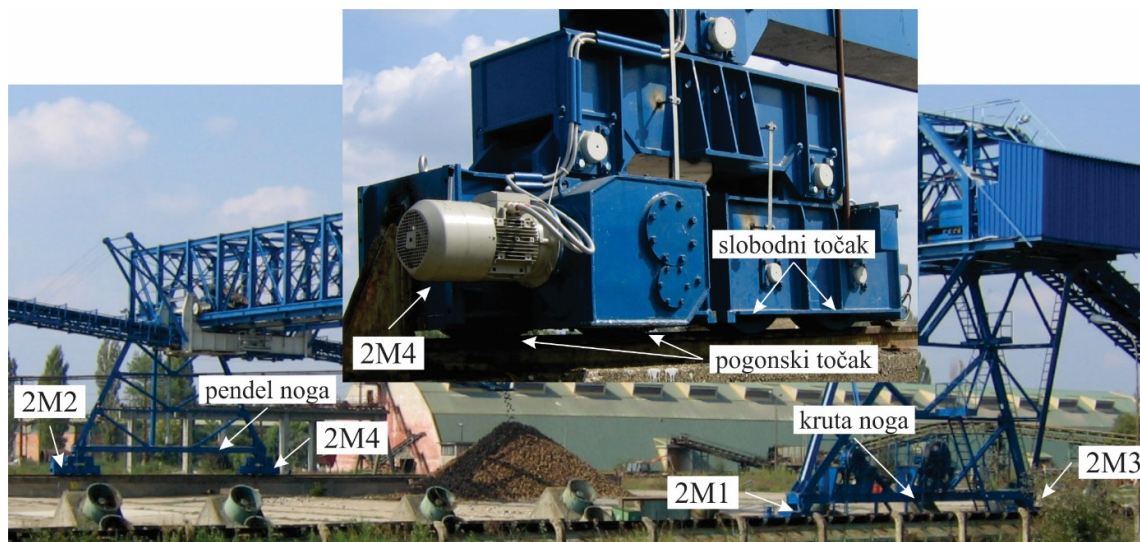
Kod algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.16, frekvencijskom pretvaraču 1U1 prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona, $n_1^* = n^*$. Za frekvencijske pretvarače 1U2 i 1U3, zadata vrednost brzine obrtanja pogona, n^* , koriguje se pripadajućim regulatorima raspodele opterećenja i njihova zadata vrednost brzine obrtanja nakon korekcije iznosi n_2^* i n_3^* , respektivno. Za frekvencijski pretvarač 1U4, zadata vrednost brzine obrtanja frekvencijskog pretvarača 1U3, n_3^* , koriguje se pripadajućim regulatorom raspodele opterećenja i njegova zadata vrednost brzine obrtanja nakon korekcije iznosi n_4^* . U skladu sa ranijom teorijskom analizom, vrednosti korekcija srazmerne su algebarskoj vrednosti razlika odgovarajućih estimiranih elektromagnetnih momenata motora, $m_{e,1}$ do $m_{e,4}$, i limitirane su unutar podešenog opsega.

Eksperimentalno podešeno proporcionalno pojačanje svih regulatora raspodele opterećenja, K_{LS} , iznosi 1 r.j. Takođe, eksperimentalno određeno podešenje limitera iznosi $\pm 2\%$.

Na opisan način realizovana je raspodela opterećenja u pogonu kretanja kolica pretovarnog mosta i to između četiri mehanički spregnuta asinhrona motora, a u hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone i koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih industrijskom komunikacionom mrežom. Implementacija opisanog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja jednostavna je i ne zahteva dodatni hardver. Eksperimentalnim podešavanjem parametara regulatora raspodele opterećenja dobijene su željene performanse pogona.

Napomena: deo PLC programa sa pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, kojim se realizuje raspodela opterećenja u pogonu kretanja kolica, dat je u Prilogu 1.

Pogon kretanja mosta je regulisani višemotorni pogon za čije se pokretanje koriste četiri trofazna asinhrona motora, 2M1 do 2M4 (slika 3.17), napajana iz pripadajućih frekvencijskih pretvarača, 2U1 do 2U4 (slika 3.13, b)). Za upravljanje radom pogona kretanja mosta iskorišćen je PLC sistem, koji upravlja radom celog pretovarnog mosta (slika 3.14).



Slika 3.17. Pogon kretanja mosta – motori 2M1 do 2M4

Motori 2M1 i 2M3 su u mehaničkoj sprezi i to direktno preko transmisionih mehanizama, točkova, šine i krute konstrukcije krute noge pretovarnog mosta. U skladu sa ranijom analizom, osnovni tehnički zahtev jeste da ovi motori dele opterećenje srazmerno svojim nominalnim snagama. U konkretnom slučaju motori su istih nominalnih snaga (5.5 kW), pa se navedeni osnovni tehnički zahtev svodi na podelu opterećenja između motora na jednake delove.

Motori 2M2 i 2M4 su u mehaničkoj sprezi i to direktno preko transmisionih mehanizama, točkova, šine i krute konstrukcije pendel noge pretovarnog mosta. U skladu sa ranijom analizom, osnovni tehnički zahtev jeste da ovi motori dele opterećenje srazmerno svojim nominalnim snagama. U konkretnom slučaju motori su istih nominalnih snaga (5.5 kW), pa se navedeni osnovni tehnički zahtev svodi na podelu opterećenja između motora na jednake delove.

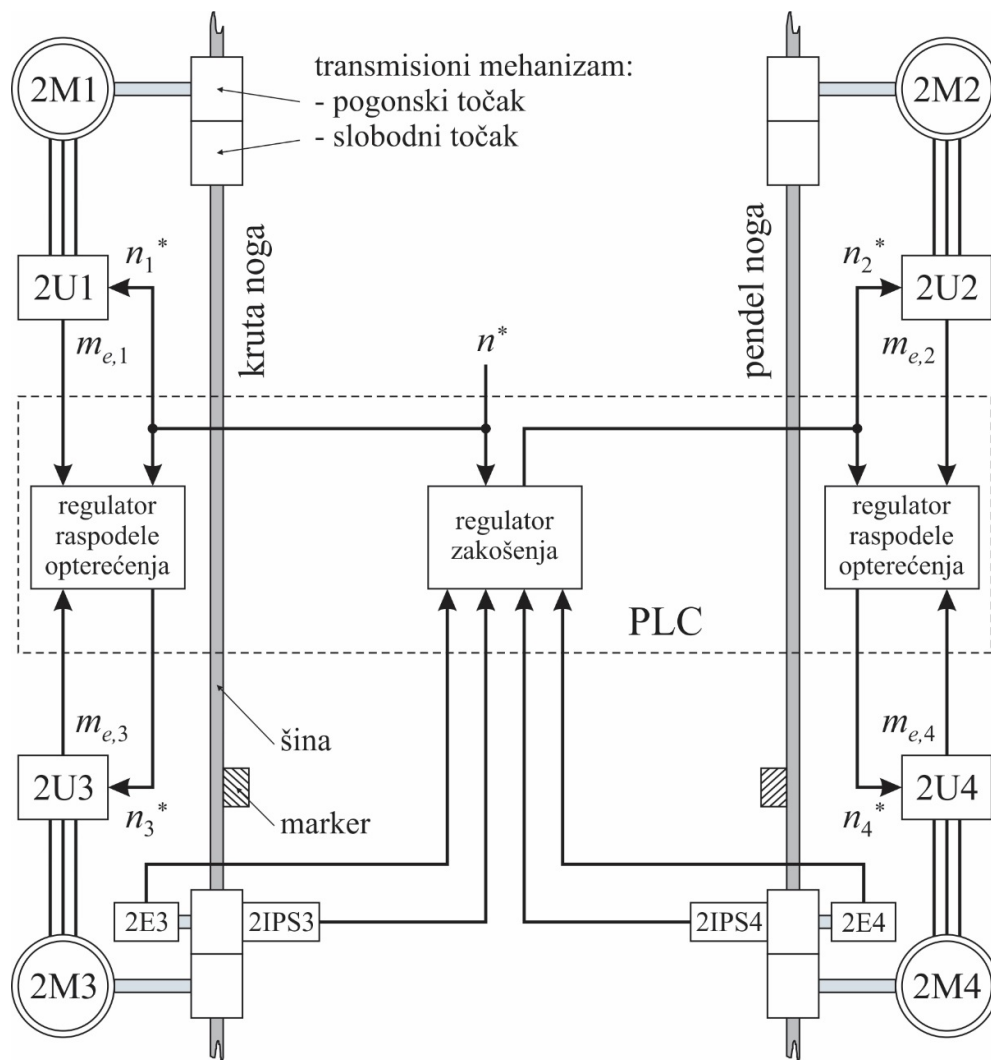
Imajući u vidu napred navedeno, a u cilju ravnomerne raspodele opterećenja između motora koji pokreću krutu nogu i u cilju ravnomerne raspodele opterećenja između motora koji pokreću pendel nogu, u algoritam upravljanja radom pogona kretanja mosta implementirana su dva regulatora raspodele opterećenja.

Rastojanje između krute noge i pendel noge pretovarnog mosta iznosi 64.5 m, a povezane su mostom rešetkaste konstrukcije. U skladu sa ranijom analizom, jasno je da se radi o konstrukciji

sa velikim rasponom kod koje su dve pokretne noge povezane mostom koji predstavlja elastičnu vezu. Osnovni tehnički zahtev koji se postavlja pred ovakvim pogonom jeste sinhrono odnosno centrirano kretanje obe strane.

Imajući u vidu napred navedeno, a u cilju regulacije zakošenja između krute noge i pendel noge, u algoritam upravljanja radom pogona kretanja mosta implementiran je regulator zakošenja.

Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja i realizaciju raspodele opterećenja u pogonu kretanja mosta, za čije se pokretanje koriste četiri asinhrona motora (2M1 do 2M4) koji se napajaju iz frekvencijskih pretvarača (2U1 do 2U4), prikazana je na slici 3.18.



Slika 3.18. Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja i realizaciju raspodele opterećenja – pogon kretanja mosta

Asinhroni motori 2M1 do 2M4 pokreću zajedničko opterećenje, pretovarni most, i regulisani su po brzini obrtanja primenom pripadajućih frekvencijskih pretvarača 2U1 do 2U4. Frekvencijski pretvarači rade u režimu po brzini, a korišćenjem sopstvenih regulatora brzine. S obzirom da se ne zahtevaju visoke performanse pogona, brzina obrtanja motora se estimira.

Regulisani višemotorni pogon kretanja mosta upravlja se po brzini i zadata vrednost brzine obrtanja je n^* .

Regulacija zakošenja između krute noge i pendel noge pretovarnog mosta, između kojih postoji elastična veza, realizovana je regulatorom zakošenja, koji je projektovan u PLC sistemu. S obzirom da se od PLC sistema ne zahtevaju visoke performanse, iskorišćen je postojeći PLC koji upravlja radom celog pretovarnog mosta.

Regulacija zakošenja između krute noge i pendel noge pretovarnog mosta realizovana je regulatorom zakošenja između frekvencijskih pretvarača 2U1 i 2U2, koji napajaju motore 2M1 i 2M2. Kod algoritma za regulaciju zakošenja u pogonu kretanja mosta, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.18, frekvencijskom pretvaraču 2U1 prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona, $n_1^* = n^*$. Za frekvencijski pretvarač 2U2, zadata vrednost brzine obrtanja pogona, n^* , koriguje se regulatorom zakošenja i njegova zadata vrednost brzine obrtanja nakon korekcije iznosi n_2^* . U skladu sa ranijom teorijskom analizom, vrednost korekcije srazmerna je algebarskoj vrednosti razlike apsolutnih pozicija enkodera 2E3 i 2E4, korigovanoj kompenzatorom spoljašnjih poremećaja i limitiranoj unutar podešenog opsega. Kompenzator spoljašnjih poremećaja uvažava i kompenzuje sve spoljašnje uticaje na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera merenjem stvarnog zakošenja kada su induktivni davači 2IPS3 i 2IPS4 iznad pripadajućih markera, montiranih simetrično duž kranske staze. Proklizavanje pogonskih točkova, kao najveći spoljašnji poremećaj, eliminisano je montažom enkodera na slobodnim točkovima.

Poznati su sledeći podaci o pogonu kretanja mosta na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta:

- trofazni asinhroni motori
 5.5 kW , 1455 o/min
- transmisioni mehanizam – pogonski točak
 $I_p = 394.7368$, $D_p = 0.5 \text{ m}$
- transmisioni mehanizam – slobodni točak
 $I_{fw} = 15.6466$, $D_{fw} = 0.5 \text{ m}$
- dužina kranske staze
 $L = 300 \text{ m}$

- kritično zakošenje

$$s_{kr} = 1 \text{ m}$$

Imajući u vidu dužinu kranske staze koju treba mapirati, a uz odgovarajući stepen sigurnosti, izabrana su dva apsolutna enkodera AC58 1212 E F.47 DP Z, proizvođača Hengstler. Enkoderi su višeobrtni, rezolucije 12 bita po obrtaju a za najviše 2^{12} obrtaja, predviđeni za priključenje na PROFIBUS DP industrijsku komunikacionu mrežu.

Za izabrane enkodere, pokazivanje enkodera po obrtaju iznosi $E_{p,rev} = 2^{12} = 4096$.

Pokazivanje enkodera po metru pređenog puta, određeno korišćenjem izraza 3.16, ima vrednost $E_{p,1m} = 40800$.

Maksimalno pokazivanje enkodera iznosi $(2^{12} \cdot 2^{12}) - 1 = 16777215$, odnosno enkoder može da mapira pređeni put u dužini od $\frac{(2^{12} \cdot 2^{12}) - 1}{E_{p,1m}} = 411.2064 \text{ m}$. Sa stanovišta dužine kranske staze koju treba mapirati, a uz odgovarajući stepen sigurnosti, jasno je da su dva apsolutna enkodera dobro izabrana.

Na slici 3.19 prikazan je apsolutni enkoder 2E4, montiran na slobodnom točku pendel noge pretovarnog mosta. Enkoder ima odgovarajuću zaštitu od mehaničkih oštećenja.



Slika 3.19. Apsolutni enkoder 2E4 na slobodnom točku

U skladu sa ranijom teorijskom analizom, a imajući u vidu vrednost kritičnog zakošenja, usvojena je vrednost za maksimalno dozvoljeno zakošenje $s_{doz} = 0.5 \text{ m}$.

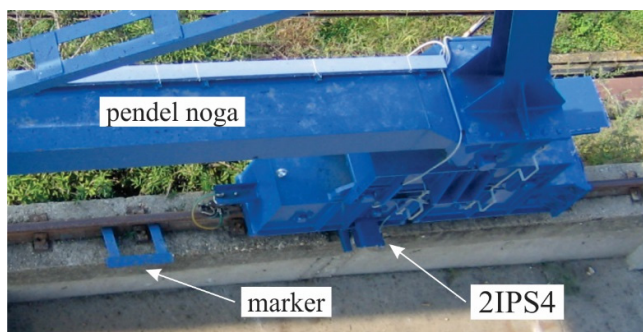
Dužina svih markera duž kranske staze ista je i jednaka je maksimalno dozvoljenom zakošenju, $l_m = s_{doz} = 0.5 \text{ m}$.

Za usvojenu vrednost maksimalno očekivane razlike između linijskih brzina krute noge i pendel noge pretovarnog mosta $\Delta v_{\%} = 1 \%$, rastojanje između svaka dva para markera, na osnovu izraza 3.7, treba da ispunjava uslov $L_m \leq 50$ m.

Takođe, broj para markera, na osnovu izraza 3.8, treba da ispunjava uslov $N_m \geq 6$.

Imajući u vidu dobijene vrednosti, usvojena su 6 parova markera duž kranske staze, montirana na rastojanju od maksimalno 50 m.

Na slici 3.20 prikazan je induktivni davač 2IPS4, montiran na pendel nozi pretovarnog mosta, i jedan od šest pripadajućih markera, montiranih duž kranske staze pendel noge. Induktivni davač ima odgovarajuću zaštitu od mehaničkih oštećenja.



Slika 3.20. Induktivni davač 2IPS4 i jedan od šest pripadajućih markera

Usvojena vrednost zadatog vremena za koje se dostiže maksimalno dozvoljeno zakošenje pod pretpostavkom nepravilnog rada regulacije zakošenja (npr. otkaz jednog enkodera) iznosi $t_z = 60$ s. Takođe, imajući u vidu nominalnu brzinu motora, usvojena maksimalna zadata vrednost brzine obrtanja pogona ima vrednost $n_{\max}^* = 1455$ o/min. Sada, granična vrednost limitera regulatora zakošenja, izražena u procentima od maksimalne zadate vrednosti brzine obrtanja pogona, na osnovu izraza 3.13, iznosi $\Delta n_{\max, \%} = 8.6356 \%$.

Proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja, sračunato na osnovu izraza 3.17, ima vrednost $K_{SC} = \frac{1}{236230}$.

Na osnovu sračunatih vrednosti za proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja i graničnu vrednost limitera regulatora zakošenja, usvojene su sledeće vrednosti: $K_{SC} = \frac{1}{236230}$ i $\Delta n_{\max, \%} = 10 \%$. Sada podešenje limitera iznosi $\pm 10 \%$. Projektovani regulator zakošenja proveren je eksperimentalno pri puštanju pogona u rad.

Na opisan način realizovana je regulacija zakošenja u pogonu kretanja mosta i to između dva asinhrona motora između kojih postoji elastična veza, a u hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone i koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih industrijskom komunikacionom mrežom. Implementacija opisanog algoritma za regulaciju zakošenja je jednostavna, a uz minimalne hardverske dodatke. Neophodan dodatni hardver čine dva apsolutna enkodera i dva induktivna davača sa odgovarajućim markerima, čiji je broj dobijen proračunom. Projektovanjem regulatora zakošenja na opisan način, uz eksperimentalnu proveru, dobijene su željene performanse pogona.

Ravnomerna raspodela opterećenja između motora koji pokreću točkove na krutoj nozi pretovarnog mosta obezbeđena je regulatorom raspodele opterećenja između frekvencijskih pretvarača 2U1 i 2U3. Kod algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja mosta, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.18, frekvencijskom pretvaraču 2U1 prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona, $n_1^* = n^*$. Za frekvencijski pretvarač 2U3, zadata vrednost brzine obrtanja pogona, n^* , koriguje se pripadajućim regulatorom raspodele opterećenja i njegova zadata vrednost brzine obrtanja nakon korekcije iznosi n_3^* . Vrednost korekcije srazmerna je algebarskoj vrednosti razlike estimiranih elektromagnetnih momenata motora, $m_{e,1}$ i $m_{e,3}$, i limitirana je unutar podešenog opsega.

Ravnomerna raspodela opterećenja između motora koji pokreću točkove na pendel nozi pretovarnog mosta obezbeđena je regulatorom raspodele opterećenja između frekvencijskih pretvarača 2U2 i 2U4. Frekvencijskom pretvaraču 2U2 prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja iz regulatora zakošenja, n_2^* . Za frekvencijski pretvarač 2U4, zadata vrednost brzine obrtanja frekvencijskog pretvarača 2U2, n_2^* , koriguje se pripadajućim regulatorom raspodele opterećenja i njegova zadata vrednost brzine obrtanja nakon korekcije iznosi n_4^* . Vrednost korekcije srazmerna je algebarskoj vrednosti razlike estimiranih elektromagnetnih momenata motora, $m_{e,2}$ i $m_{e,4}$, i limitirana je unutar podešenog opsega.

Eksperimentalno podešeno proporcionalno pojačanje za oba regulatora raspodele opterećenja, K_{LS} , iznosi 1 r.j. Takođe, eksperimentalno određeno podešenje limitera iznosi $\pm 2\%$.

Na opisan način realizovana je raspodela opterećenja u pogonu kretanja mosta i to između dva mehanički spregnuta asinhrona motora na krutoj nozi pretovarnog mosta i između dva mehanički spregnuta asinhrona motora na pendel nozi pretovarnog mosta, a u hardverskom okruženju koje je karakteristično za regulisane višemotorne pogone i koje podrazumeva primenu frekvencijskih pretvarača i PLC sistema međusobno povezanih industrijskom komunikacionom

mrežom. Implementacija opisanog algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja jednostavna je i ne zahteva dodatni hardver. Eksperimentalnim podešavanjem parametara regulatora raspodele opterećenja dobijene su željene performanse pogona.

Napomena: deo PLC programa sa pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, kojim se realizuje regulacija zakošenja i raspodela opterećenja u pogonu kretanja mosta, dat je u Prilogu 2.

3.4. Eksperimentalni rezultati za raspodelu opterećenja i regulaciju zakošenja u regulisanim višemotornim pogonima inženjerskog objekta Pretovarni most u Fabrici šećera TE-TO Senta

Kod pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, za regulisani višemotorni pogon kretanja kolica (pogon mačke) primenjen je algoritam za realizaciju raspodele opterećenja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.1, a na način prikazan na slici 3.16. Takođe, za regulisani višemotorni pogon kretanja mosta primenjen je algoritam za regulaciju zakošenja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.2, i algoritam za realizaciju raspodele opterećenja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.1, a na način prikazan na slici 3.18.

Pri puštanju u rad pogona kretanja kolica eksperimentalno je podešeno proporcionalno pojačanje svih regulatora raspodele opterećenja na vrednost $K_{LS} = 1$ r.j. Takođe, eksperimentalno određeno podešenje njihovih limitera iznosi $\pm 2\%$.

Pri puštanju u rad pogona kretanja mosta eksperimentalno je proveren projektovani regulator zakošenja. Proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja podešeno je na računski dobijenu vrednost $K_{SC} = \frac{1}{236230}$. Podešenje njegovog limitera iznosi $\pm 10\%$. Takođe, eksperimentalno je podešeno proporcionalno pojačanje oba regulatora raspodele opterećenja na vrednost $K_{LS} = 1$ r.j. Eksperimentalno određeno podešenje njihovih limitera iznosi $\pm 2\%$.

U cilju utvrđivanja performansi pogona kretanja kolica i pogona kretanja mosta, a nakon puštanja u rad pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina i to posredstvom frekvencijskih pretvarača (serije ASC550) i PLC sistema (serije 90, CPU 07 KT 98), a korišćenjem softvera "907 AC 1131", sve proizvođača ABB.

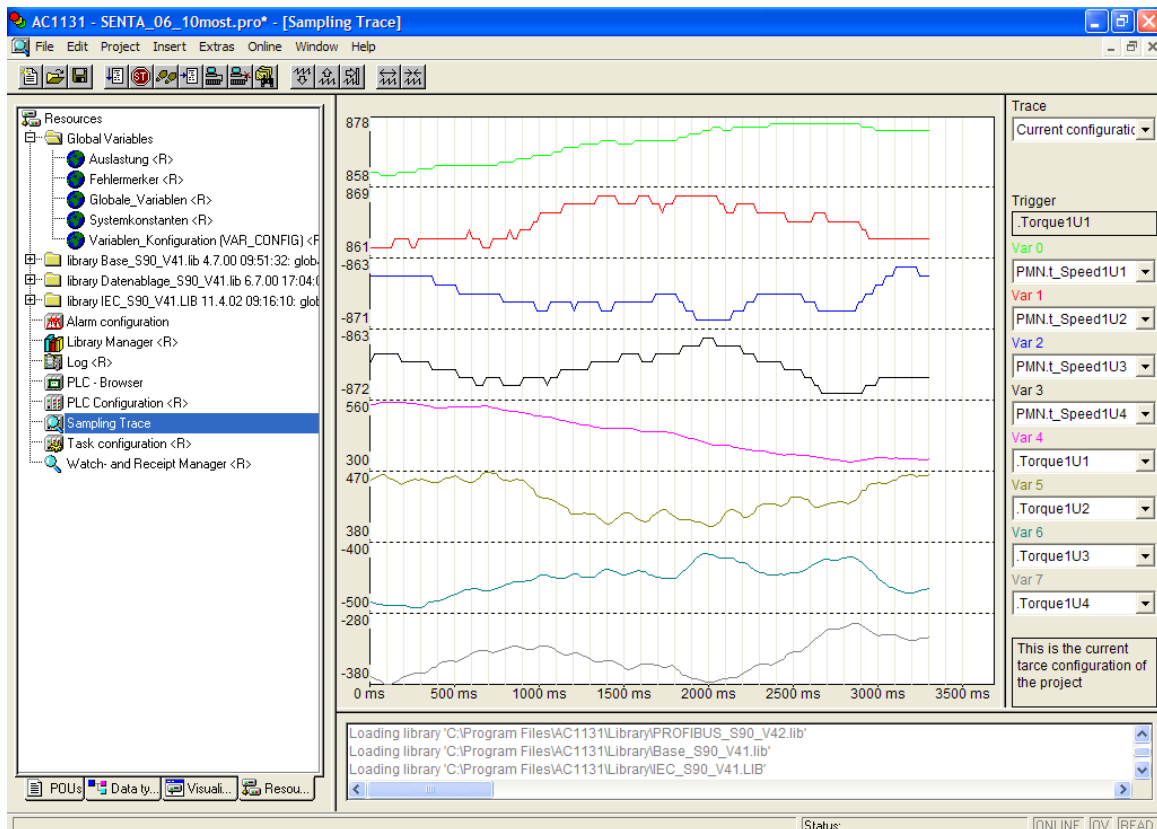
Snimljene su vremenske zavisnosti brzina obrtanja motora, momenata motora i sračunate vrednosti zakošenja, a sa vremenom uzorkovanja od 20 ms.

PLC sistem brzine obrtanja motora i momente motora preuzima iz pripadajućih frekvencijskih pretvarača putem PROFIBUS DP industrijske komunikacione mreže. Brzine obrtanja motora su estimirane veličine, a date su kao celobrojne vrednosti u [o/min]. Momenti

motora su estimirane veličine, a dati su kao celobrojne vrednosti u procentima od nominalnih momenata pomnoženo sa deset da bi se uvažila prva decimala [% · 10].

Sračunata vrednost zakošenja računa se u PLC sistemu, a data je kao celobrojna vrednost u [cm]. Principijelna blok šema za regulaciju zakošenja, prikazana na slici 3.2, koristi sračunatu vrednost zakošenja datu u obliku celobrojne vrednosti, a kao razliku razlike apsolutnih pozicija dva enkodera i kompenzacije, čime se postiže visoka tačnost. Ovde je, u cilju jasnijeg prikaza, sračunata vrednost zakošenja preračunata u [cm], i to celobrojnim deljenjem navedene vrednosti sa vrednošću pokazivanja enkodera po centimetru pređenog puta koja iznosi $\frac{E_{p,1m}}{100} = 408$. Na ovaj način, zakošenju od 0 cm odgovaraju vrednosti iz opsega $\pm (408-1) = \pm 407$, zakošenju od 1 cm odgovaraju vrednosti iz opsega $408 \div 2 \cdot 408 - 1 = 815$ itd.

Na slici 3.21 prikazane su vremenske zavisnosti snimljene korišćenjem softvera “907 AC 1131”. Prikazane su vremenske zavisnosti brzina obrtanja motora i momenata motora za pogon kretanja kolica, pri isključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi koji je usvojen kao pozitivan smer kretanja.



Slika 3.21. Vremenske zavisnosti snimljene korišćenjem softvera “907 AC 1131”

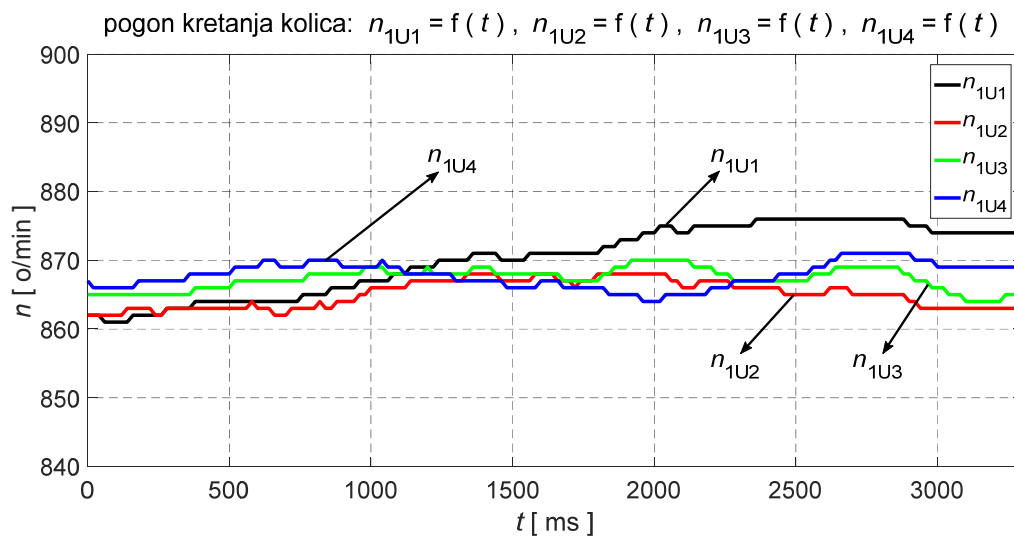
Vremenske zavisnosti, dobijene korišćenjem softvera "907 AC 1131", pogodne su za praćenje na ekranu i analizu u realnom vremenu, ali ne i za naknadnu analizu na papiru jer su nepregledne i teško razumljive. Iz tog razloga, vremenske zavisnosti snimljene korišćenjem softvera "907 AC 1131" izvezene su u tekstualnu datoteku (*.txt file), a zatim uvezene u softver pogodan za crtanje.

Analizom slike 3.21 može se zaključiti da pri pozitivnom smeru kretanja kolica brzine obrtanja motora i momenti motora, za motore 1M3 i 1M4, imaju negativne vrednosti. Razlog je isti redosled faza kod svih motora i specifičnost načina montaže, što je jasno sa slike 3.16. Prilikom crtanja vremenskih zavisnosti, a u cilju preglednosti, pri pozitivnom smeru kretanja svim brzinama obrtanja motora i svim momentima motora dodeljene su pozitivne vrednosti. Takođe, prilikom crtanja vremenskih zavisnosti momenata motora, a u cilju preglednosti, svi momenti motora podeljeni su sa deset i dati su u procentima od nominalnih momenata [%].

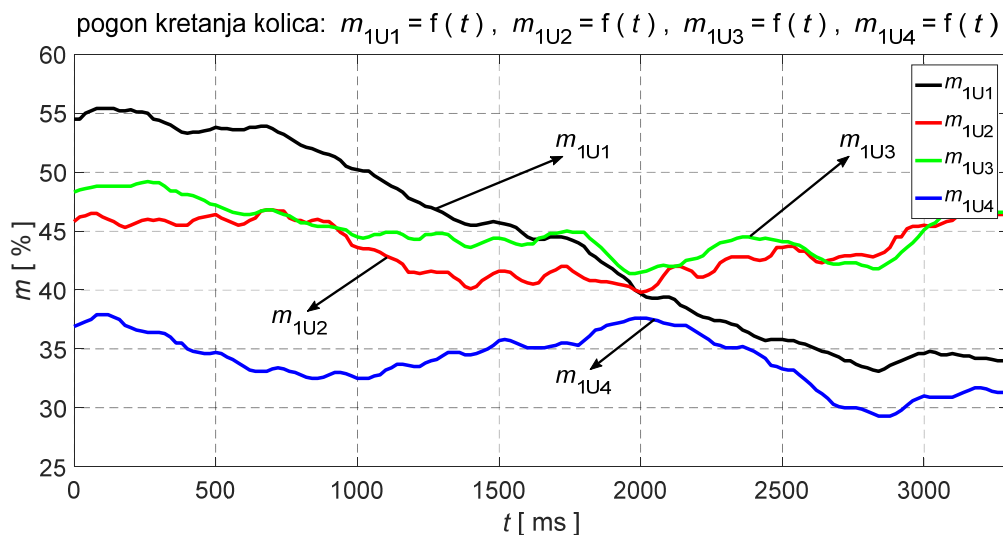
U cilju dokazivanja performansi pogona kretanja kolica, na slikama 3.22 do 3.37 prikazane su vremenske zavisnosti brzina obrtanja motora, momenata motora, kao i razlike brzina obrtanja motora i razlike momenata motora bitne za algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.16. Navedene vremenske zavisnosti snimljene su za četiri karakteristična slučaja, a pri približno istim uslovima rada pogona kretanja kolica. Zadana vrednost brzine obrtanja pogona u svim slučajevima je ista i iznosi $n^*=865$ o/min.

Na slikama 3.22 do 3.25 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja kolica, snimljene pri isključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi koji je usvojen kao pozitivan smer kretanja. Vremenske zavisnosti prikazane na slikama 3.22 i 3.23 odgovaraju vremenskim zavisnostima prikazanim na slici 3.21.

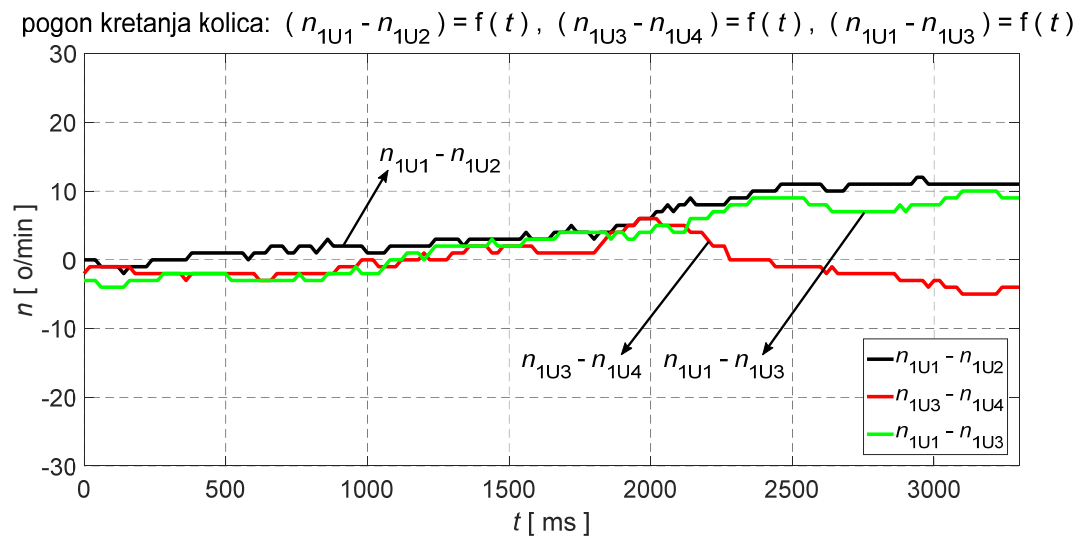
Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se svim frekvencijskim pretvaračima, $n^* = n_{1U1}^* = n_{1U2}^* = n_{1U3}^* = n_{1U4}^*$.



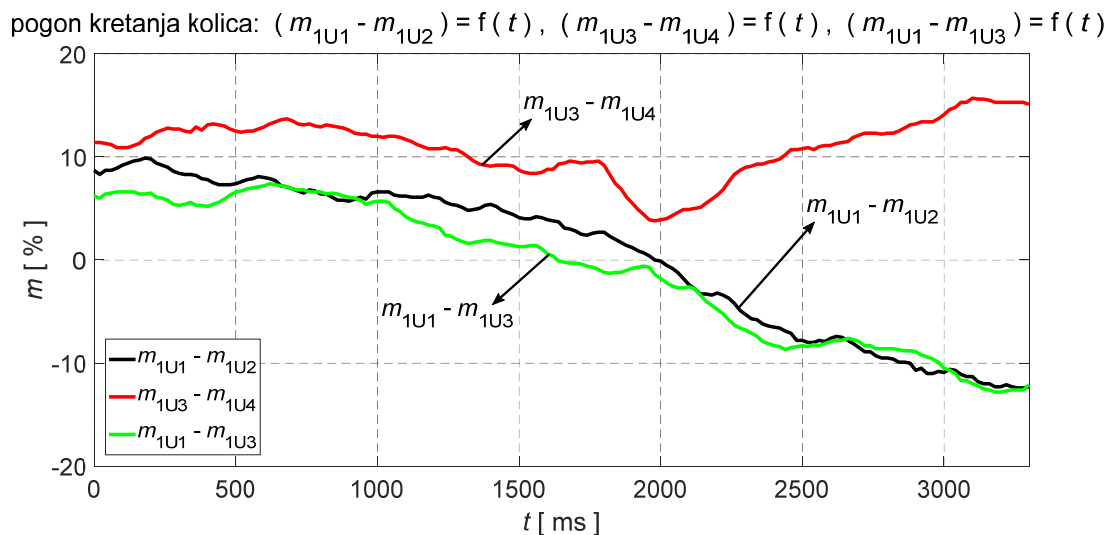
Slika 3.22. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: n_{1U1} do n_{1U4}



Slika 3.23. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: m_{1U1} do m_{1U4}



Slika 3.24. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: $n_{1U1}-n_{1U2}$, $n_{1U3}-n_{1U4}$, $n_{1U1}-n_{1U3}$

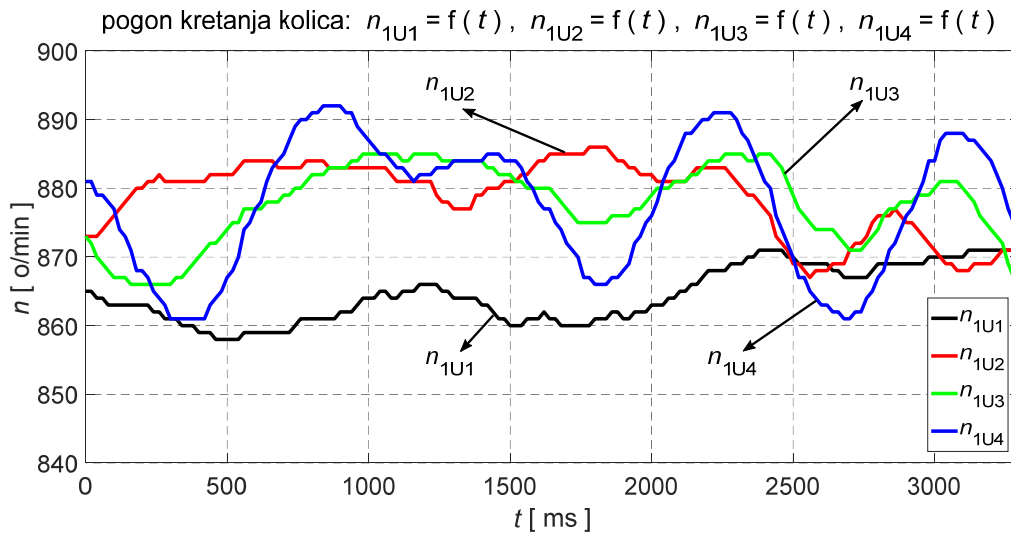


Slika 3.25. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: $m_{1U1}-m_{1U2}$, $m_{1U3}-m_{1U4}$, $m_{1U1}-m_{1U3}$

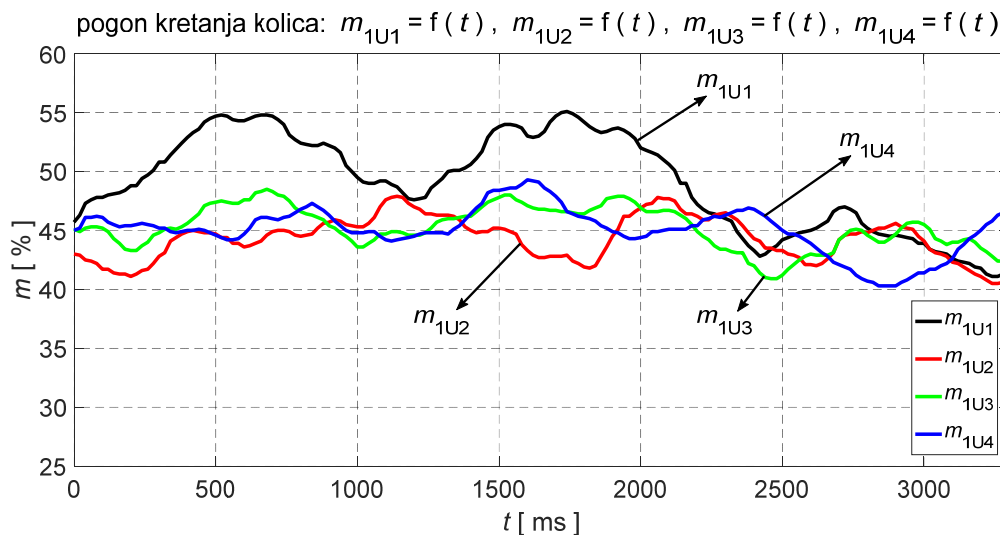
Analizom slika 3.22 i 3.24 može se zaključiti da brzine obrtanja motora, n_{1U1} do n_{1U4} , “dobro” prate zadatu vrednost. Međutim, usled različitih spoljašnjih poremećaja, to za posledicu ima znatnu razliku u momentima motora, m_{1U1} do m_{1U4} , i do oko 15 % od nominalnog momenta, što se vidi analizom slika 3.23 i 3.25. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica različito opterećenje pojedinih motora, između ostalog, dovodi do zakošenja kolica. S obzirom da kolica ne mogu da spadnu sa šina, zakošenje prouzrokuje oštećenja konstrukcije i pojavu neprijatnih zvukova. Imajući u vidu napred navedeno, razlika između momenata motora nameće potrebu za primenom algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica.

Na slikama 3.26 do 3.29 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja kolica, snimljene pri uključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi koji je usvojen kao pozitivan smer kretanja.

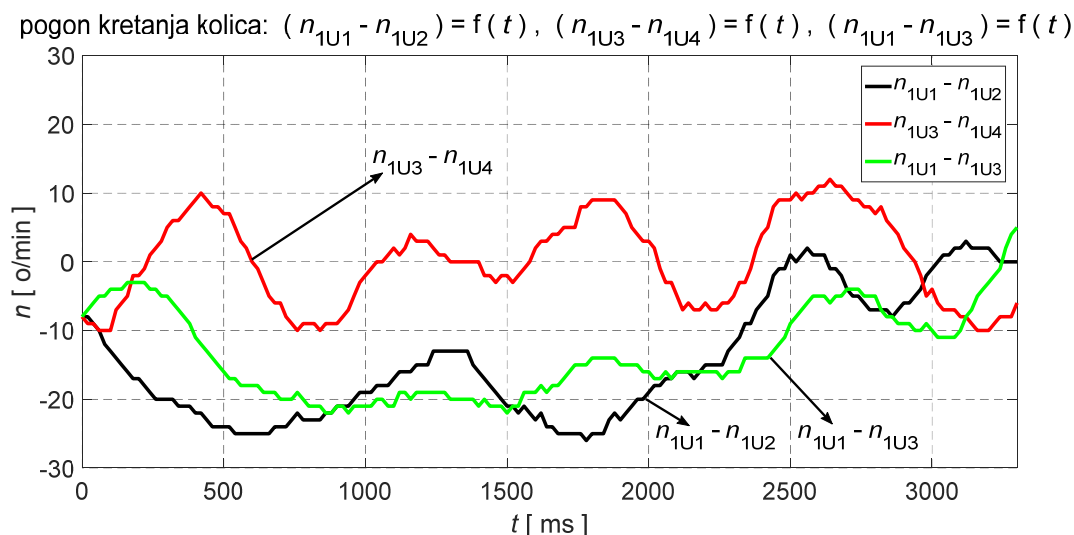
Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 1U1, $n^* = n_{1U1}^*$. Za frekvencijske pretvarače 1U2, 1U3 i 1U4, zadate vrednosti brzine obrtanja dobijaju se iz pripadajućih regulatora raspodele opterećenja i iznose n_{1U2}^* , n_{1U3}^* i n_{1U4}^* , respektivno.



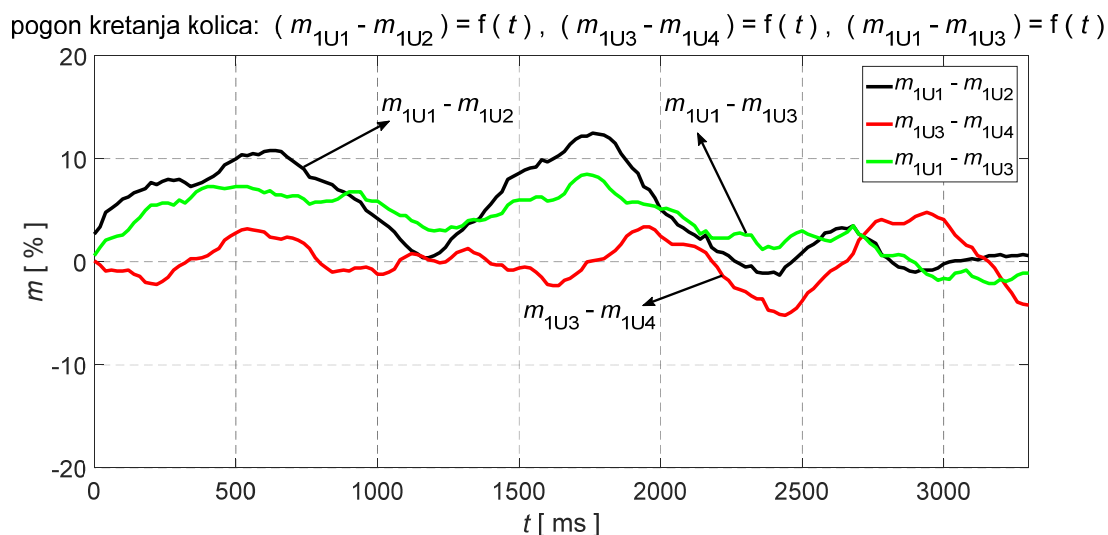
Slika 3.26. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: n_{1U1} do n_{1U4}



Slika 3.27. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: m_{1U1} do m_{1U4}



Slika 3.28. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: $n_{1U1} - n_{1U2}$, $n_{1U3} - n_{1U4}$, $n_{1U1} - n_{1U3}$



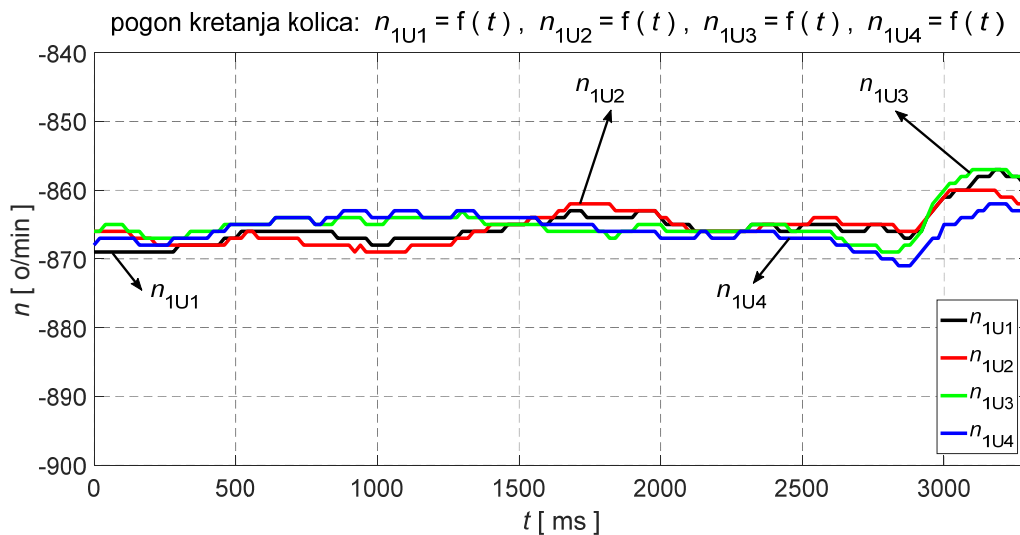
Slika 3.29. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: $m_{1U1} - m_{1U2}$, $m_{1U3} - m_{1U4}$, $m_{1U1} - m_{1U3}$

Analizom slike 3.27 može se zaključiti da se vrednosti momenata motora m_{1U2} do m_{1U4} menjaju u uskim granicama, od oko $\pm 3\%$, dok im je srednja vrednost približno ista i iznosi oko 45%. Izuzetak je moment motora m_{1U1} koji do približno 2.2 s odstupa od napred navedenog usled nekog spoljašnjeg poremećaja. Nakon približno 2.2 s kompenzovan je uticaj spoljašnjeg poremećaja i ima se ravnomerna raspodela opterećenja između svih motora, što se vidi analizom slike 3.29. Može se zaključiti da momenti motora, m_{1U1} do m_{1U4} , imaju vrednosti koje se menjaju u uskim granicama, od oko $\pm 3\%$. Sa slike 3.26 može se zaključiti da brzina obrtanja motora n_{1U1}

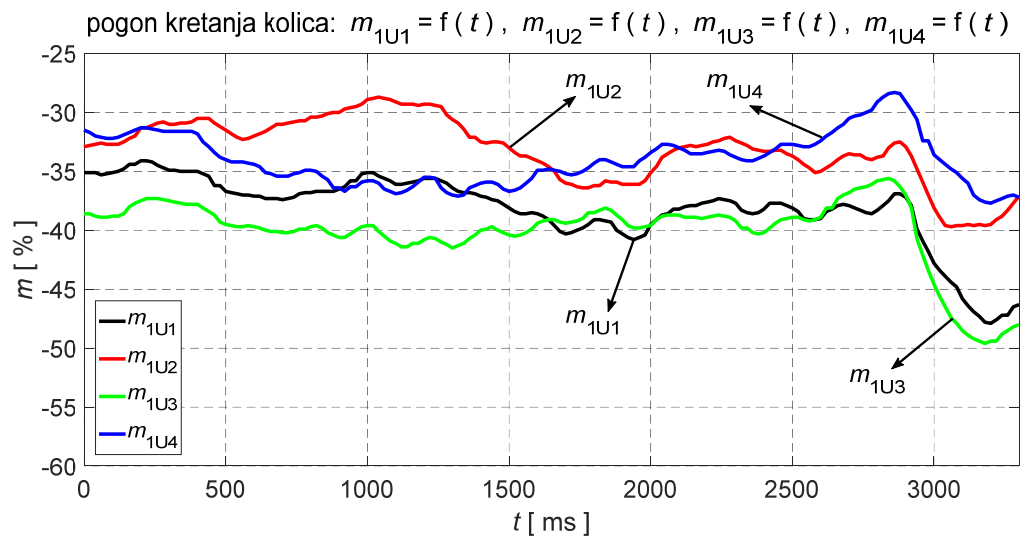
“dobro” prati zadatu vrednost. Međutim, usled različitih spoljašnjih poremećaja, ravnomerna raspodela opterećenja za posledicu ima znatnu razliku u brzinama obrtanja motora, n_{1U1} do n_{1U4} , što se vidi analizom slika 3.26 i 3.28. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica, ravnomerna raspodela opterećenja sprečava zakošenje kolica, a samim tim i oštećenja konstrukcije kao i pojavu neprijatnih zvukova.

Na slikama 3.30 do 3.33 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja kolica, snimljene pri isključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od krute noge ka pendel nozi koji je usvojen kao negativan smer kretanja.

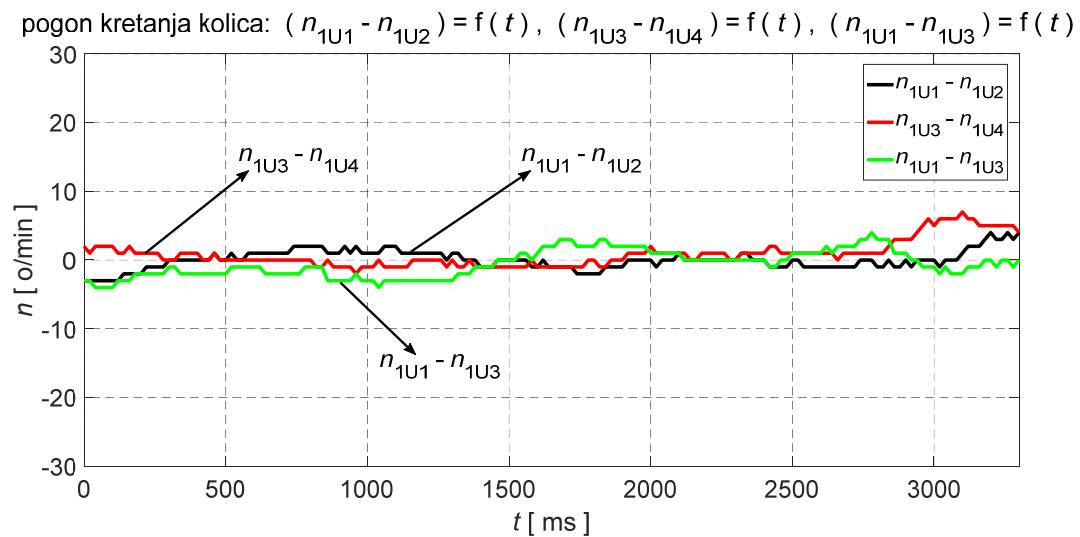
Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se svim frekvencijskim pretvaračima, $n^* = n_{1U1}^* = n_{1U2}^* = n_{1U3}^* = n_{1U4}^*$.



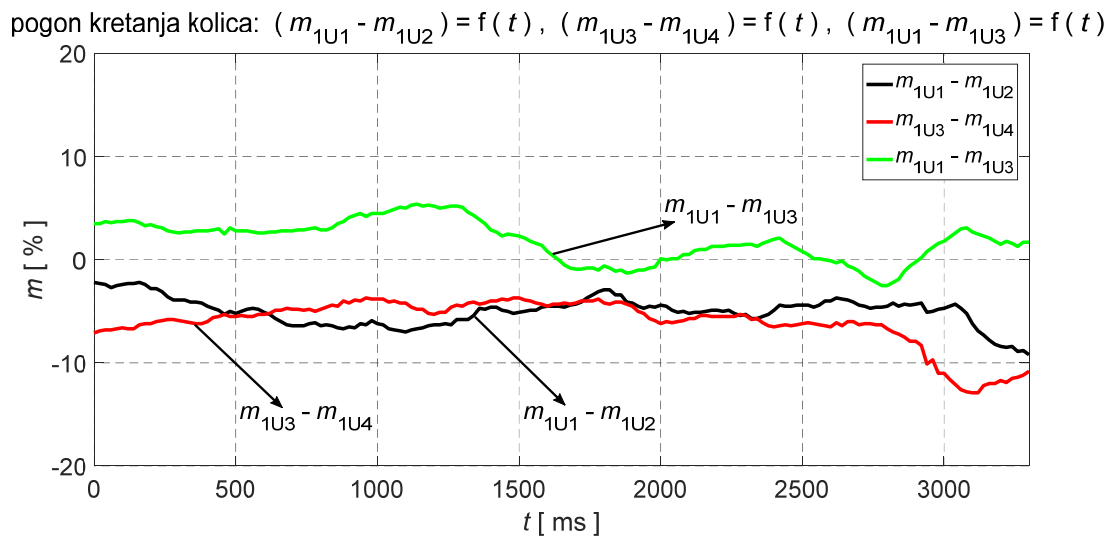
Slika 3.30. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: n_{1U1} do n_{1U4}



Slika 3.31. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: m_{1U1} do m_{1U4}



Slika 3.32. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: $n_{1U1} - n_{1U2}$, $n_{1U3} - n_{1U4}$, $n_{1U1} - n_{1U3}$



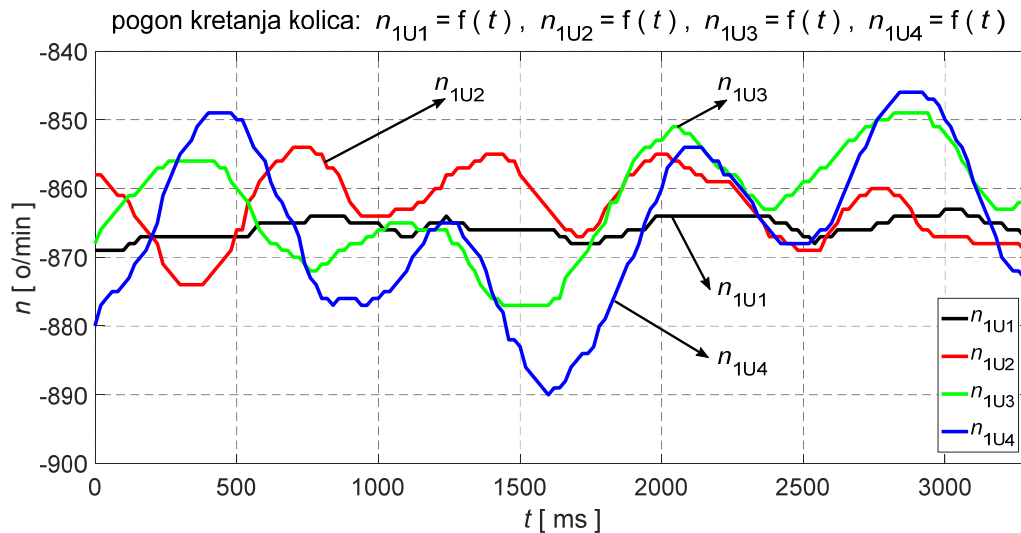
Slika 3.33. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, isključeni regulatori raspodele opterećenja: $m_{1U1} - m_{1U2}$, $m_{1U3} - m_{1U4}$, $m_{1U1} - m_{1U3}$

Vremenske zavisnosti za pogon kretanja kolica, snimljene pri isključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, očekivano su slične vremenskim zavisnostima snimljenim pri isključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od pendel noge ka krutoj nozi (slike 3.22 do 3.25). Imajući to u vidu, i njihova analiza nameće iste zaključke.

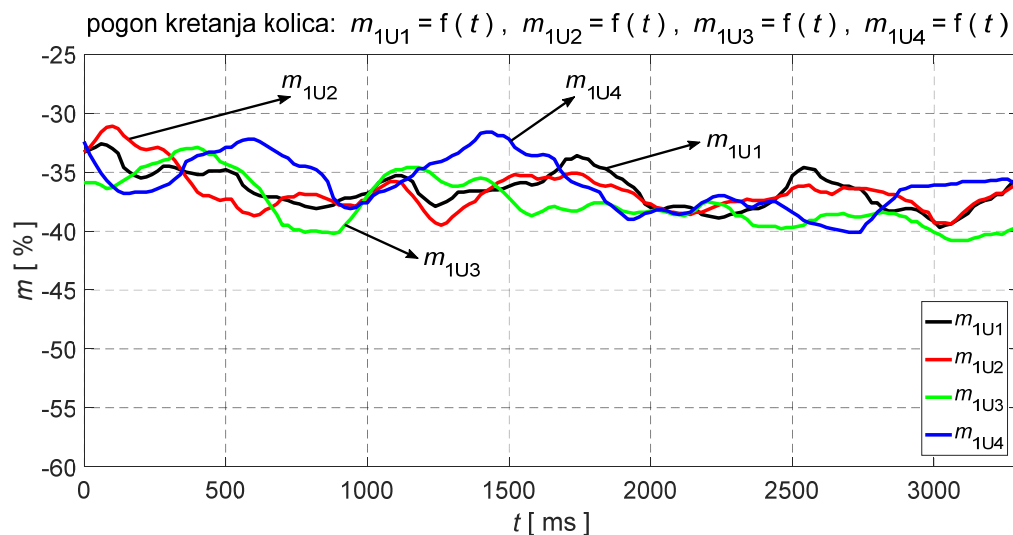
Analizom slika 3.30 i 3.32 može se zaključiti da brzine obrtanja motora, n_{1U1} do n_{1U4} , “dobro” prate zadatu vrednost. Međutim, usled različitih spoljašnjih poremećaja, to za posledicu ima znatnu razliku u momentima motora, m_{1U1} do m_{1U4} , i do oko 12 % od nominalnog momenta, što se vidi analizom slika 3.31 i 3.33. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica različito opterećenje pojedinih motora, između ostalog, dovodi do zakošenja kolica. S obzirom da kolica ne mogu da spadnu sa šina, zakošenje prouzrokuje oštećenja konstrukcije i pojavu neprijatnih zvukova. Imajući u vidu napred navedeno, razlika između momenata motora nameće potrebu za primenom algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica.

Na slikama 3.34 do 3.37 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja kolica, snimljene pri uključenim regulatorima raspodele opterećenja, a za smer kretanja od krute noge ka pendel nozi koji je usvojen kao negativan smer kretanja.

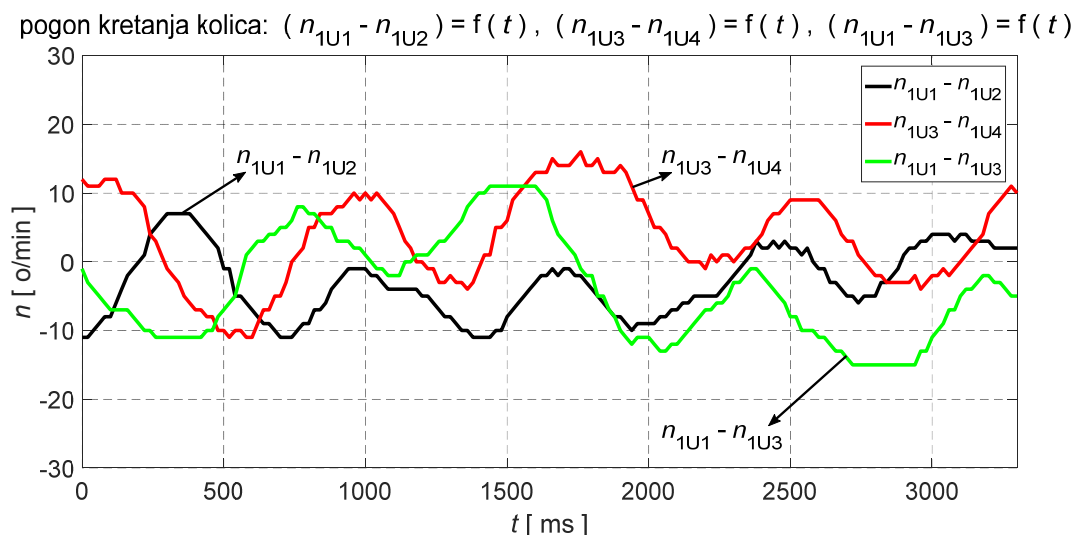
Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 1U1, $n^* = n_{1U1}^*$. Za frekvencijske pretvarače 1U2, 1U3 i 1U4, zadate vrednosti brzine obrtanja dobijaju se iz pripadajućih regulatora raspodele opterećenja i iznose n_{1U2}^* , n_{1U3}^* i n_{1U4}^* , respektivno.



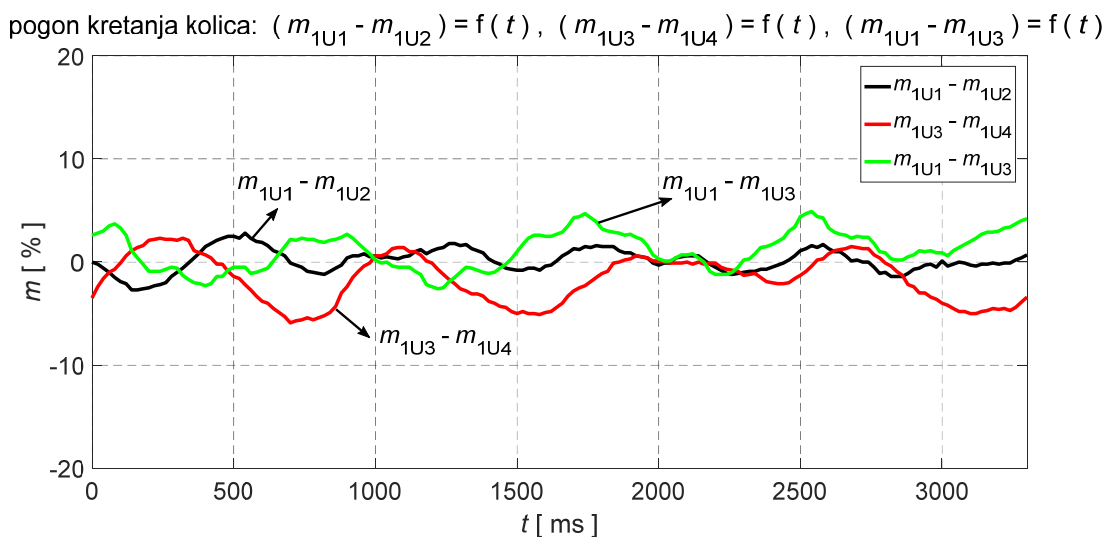
Slika 3.34. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: n_{1U1} do n_{1U4}



Slika 3.35. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: m_{1U1} do m_{1U4}



Slika 3.36. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: $n_{1U1} - n_{1U2}$, $n_{1U3} - n_{1U4}$, $n_{1U1} - n_{1U3}$



Slika 3.37. Pogon kretanja kolica, smer kretanja od krute noge ka pendel nozi, uključeni regulatori raspodele opterećenja: $m_{1U1} - m_{1U2}$, $m_{1U3} - m_{1U4}$, $m_{1U1} - m_{1U3}$

Analizom slike 3.35 može se zaključiti da se vrednosti momenata motora m_{1U1} do m_{1U4} menjaju u uskim granicama, od oko $\pm 3\%$, dok im je srednja vrednost približno ista. Takođe, sa slike 3.37 jasno je da se razlike momenata motora, bitne za algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja $m_{1U1} - m_{1U2}$, $m_{1U3} - m_{1U4}$ i $m_{1U1} - m_{1U3}$, menjaju u uskim granicama, od oko $\pm 4\%$, dok im je srednja vrednost približno jednaka nuli. Na osnovu napred navedenog nameće se zaključak da se ima ravnomerna raspodela opterećenja između svih motora. Sa slike 3.34 može se zaključiti da brzina obrtanja motora n_{1U1} “dobro” prati zadatu vrednost. Međutim, usled različitih spoljašnjih

poremećaja, ravnomerna raspodela opterećenja za posledicu ima znatnu razliku u brzinama obrtanja motora, n_{1U1} do n_{1U4} , što se vidi analizom slika 3.34 i 3.36. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica, ravnomerna raspodela opterećenja sprečava zakošenje kolica, a samim tim i oštećenja konstrukcije kao i pojavu neprijatnih zvukova.

Na slikama 3.22 do 3.37 prikazane su vremenske zavisnosti brzina obrtanja motora, momenata motora, kao i razlike brzina obrtanja motora i razlike momenata motora bitne za algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.16. Navedene vremenske zavisnosti snimljene su pri približno istim uslovima rada pogona, za oba smera kretanja kolica i to sa isključenim i uključenim regulatorima raspodele opterećenja.

Pri radu pogona sa isključenim regulatorima raspodele opterećenja brzine obrtanja motora “dobro” prate zadatu vrednost. Međutim, usled različitih spoljašnjih poremećaja, javlja se znatna razlika u momentima motora. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica različito opterećenje pojedinih motora, između ostalog, dovodi do zakošenja kolica, što prouzrokuje oštećenja konstrukcije i pojavu neprijatnih zvukova. Takođe, pri opterećenjima bliskim nominalnim, usled neravnomerne raspodele opterećenja, ima se slučaj da su pojedini motori preopterećeni a pojedini podopterećeni. Imajući u vidu napred navedeno, jasno je da je neophodno obezbediti ravnomernu raspodelu opterećenja između motora u regulisanom višemotornom pogonu kretanja kolica.

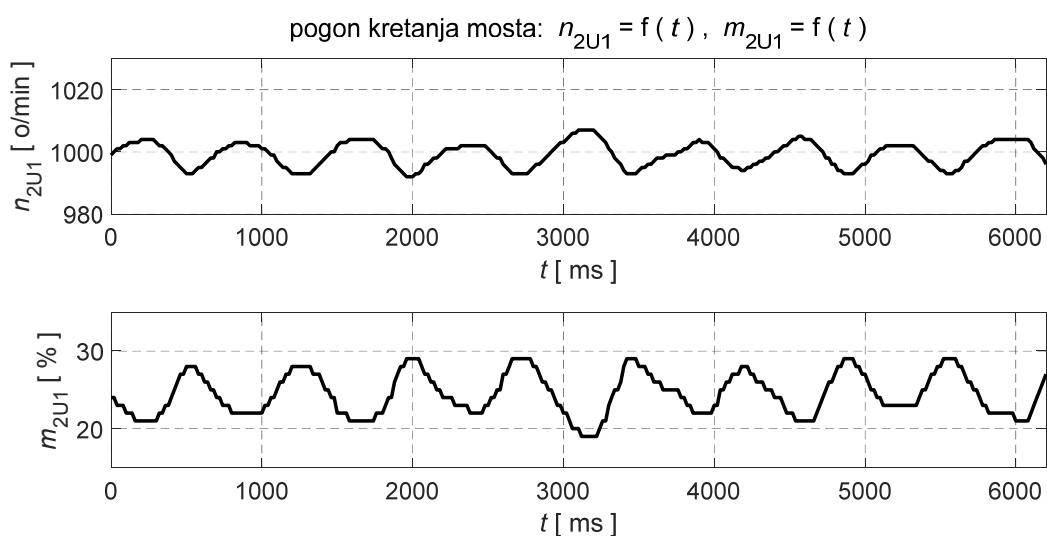
Pri radu pogona sa uključenim regulatorima raspodele opterećenja vrednosti momenata motora menjaju se u uskim granicama, dok im je srednja vrednost približno ista. Jasno je da se ima ravnomerna raspodela opterećenja između svih motora. Kao posledica rada regulatora raspodele opterećenja, a usled različitih spoljašnjih poremećaja, može da se javi znatna razlika u brzinama obrtanja motora, koja se u cilju stabilnog rada pogona ograničava limiterom. U konkretnom slučaju pogona kretanja kolica, ravnomerna raspodela opterećenja sprečava zakošenje kolica, a samim tim i oštećenja konstrukcije kao i pojavu neprijatnih zvukova. Takođe, pri opterećenjima bliskim nominalnim, kod ravnomerne raspodele opterećenja ima se maksimalno iskorišćenje instalisane opreme.

Imajući u vidu napred navedeno, kao i eksperimentalne rezultate priložene na slikama 3.22 do 3.37, nameće se zaključak da je u regulisanom višemotornom pogonu kretanja kolica neophodna primena algoritma za ravnomernu raspodelu opterećenja, kao i da primenjeni algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.16 ima zadovoljavajuće performanse.

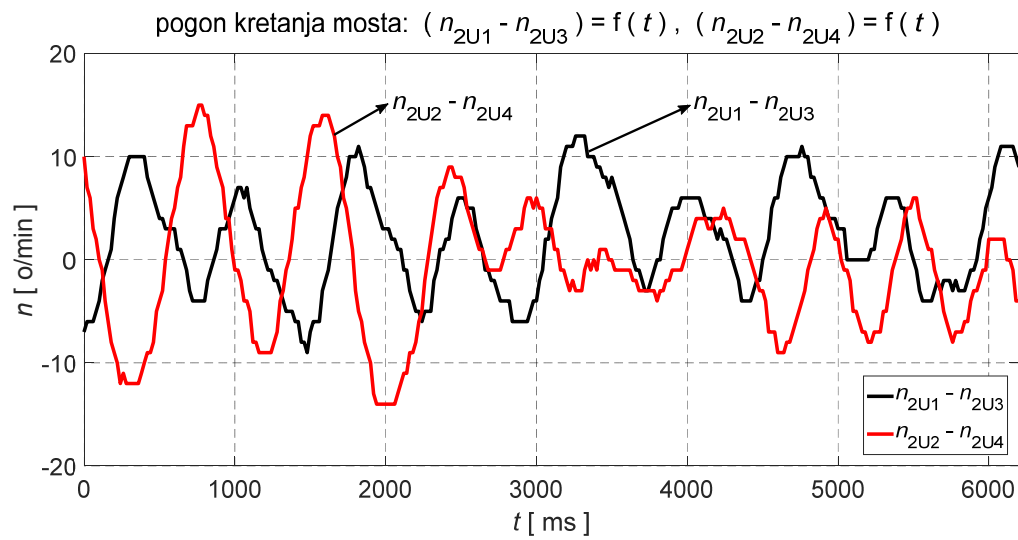
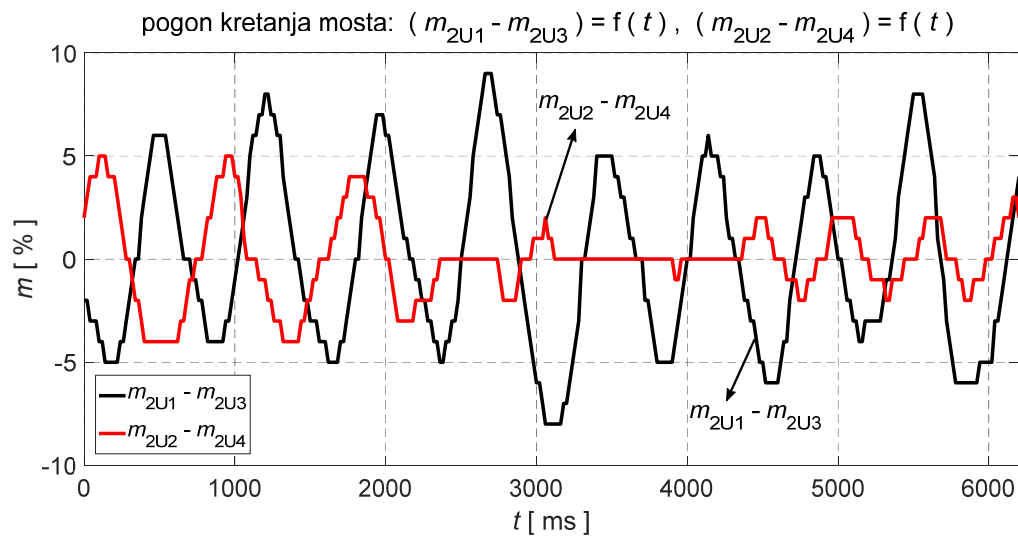
U cilju dokazivanja performansi pogona kretanja mosta, na slikama 3.38 do 3.47 prikazane su vremenske zavisnosti brzine obrtanja motora 2M1, momenta motora 2M1, sračunate vrednosti zakošenja, kao i razlike brzina obrtanja motora i razlike momenata motora bitne za algoritam za regulaciju zakošenja i ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja mosta čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.18. Ravnomerna raspodela opterećenja detaljno je analizirana pri utvrđivanju performansi pogona kretanja kolica pa će, iz tog razloga, kod pogona kretanja mosta akcenat biti stavljen na utvrđivanju performansi regulacije zakošenja. Takođe, imajući u vidu da je konstrukcija mosta elastična, te da može biti narušena stabilnost konstrukcije kada zakošenje premaši kritičnu vrednost, odnosno da konstrukcija mosta može da spadne sa šina, navedene vremenske zavisnosti snimljene su samo sa uključenim regulatorom zakošenja, a za dva karakteristična slučaja.

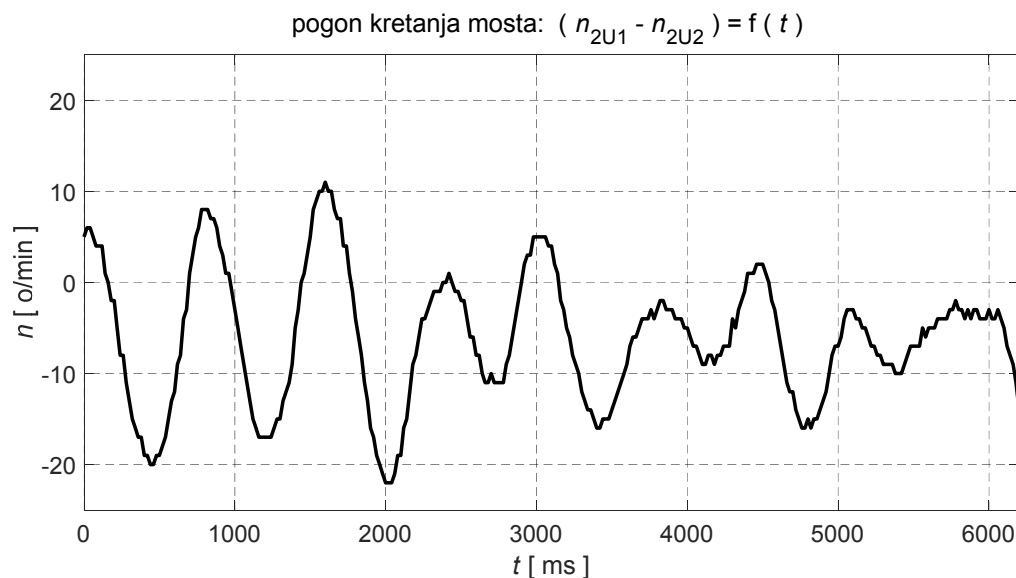
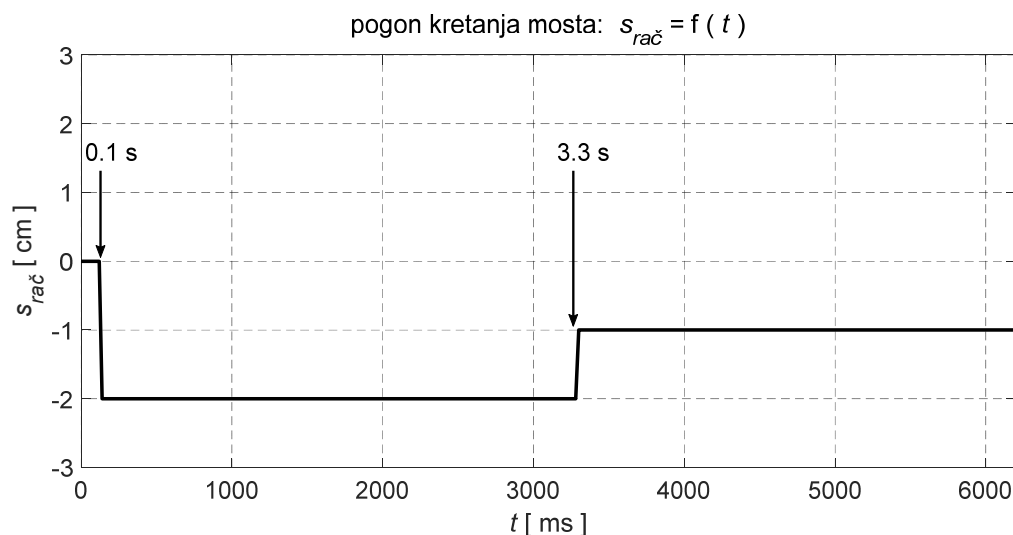
Na slikama 3.38 do 3.42 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja mosta, a za smer kretanja ka kosoj traci (slike 3.12 i 3.17) koji je usvojen kao pozitivan smer kretanja.

Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 2U1, $n^* = n_{2U1}^*$, i ima vrednost 1000 o/min. Za frekvencijski pretvarač 2U2, zadata vrednost brzine obrtanja dobija se iz regulatora zakošenja i iznosi n_{2U2}^* . Za frekvencijske pretvarače 2U3 i 2U4, zadate vrednosti brzine obrtanja dobijaju se iz pripadajućih regulatora raspodele opterećenja i iznose n_{2U3}^* i n_{2U4}^* , respektivno.



Slika 3.38. Pogon kretanja mosta, smer kretanja ka kosoj traci: n_{2U1} i m_{2U1}

Slika 3.39. Pogon kretanja mosta, smer kretanja ka kosoj traci: $n_{2U1}-n_{2U3}$ i $n_{2U2}-n_{2U4}$ Slika 3.40. Pogon kretanja mosta, smer kretanja ka kosoj traci: $m_{2U1}-m_{2U3}$ i $m_{2U2}-m_{2U4}$

Slika 3.41. Pogon kretanja mosta, smer kretanja ka kosoj traci: $n_{2U1}-n_{2U2}$ Slika 3.42. Pogon kretanja mosta, smer kretanja ka kosoj traci: $s_{rač}$

Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 2U1, $n^* = n_{2U1}^*$, i ima vrednost 1000 o/min. Sa slike 3.38 može se zaključiti da brzina obrtanja motora n_{2U1} “dobro” prati zadatu vrednost, a da usled različitih spoljašnjih poremećaja to za posledicu ima talasnost momenta motora m_{2U1} od oko 8 % od nominalnog momenta.

Analizom slike 3.40 jasno je da se razlike momenata motora, bitne za ravnomernu raspodelu opterećenja $m_{2U1}-m_{2U3}$ i $m_{2U2}-m_{2U4}$, menjaju u uskim granicama od oko $\pm 7\%$ i $\pm 4\%$ respektivno, dok im je srednja vrednost približno jednaka nuli. Na osnovu napred navedenog nameće se zaključak da se ima ravnomerna raspodela opterećenja između motora 2M1 i 2M3 na krutoj nozi,

odnosno između motora 2M2 i 2M4 na pendel nozi pretovarnog mosta. Usled različitih spoljašnjih poremećaja, ravnomerna raspodela opterećenja za posledicu ima razliku u brzinama obrtanja motora, $n_{2U1}-n_{2U3}$ i $n_{2U2}-n_{2U4}$, što se vidi sa slike 3.39. U konkretnom slučaju pogona kretanja mosta, ravnomerna raspodela opterećenja između motora na krutoj nozi i između motora na pendel nozi, pri opterećenjima bliskim nominalnim omogućava maksimalno iskorišćenje instalisane opreme, odnosno sprečava slučaj da je jedan motor preopterećen a drugi podopterećen.

Regulacija zakošenja između krute noge i pendel noge pretovarnog mosta realizovana je regulatorom zakošenja između frekvencijskih pretvarača 2U1 i 2U2, koji napajaju motore 2M1 i 2M2 (slika 3.18). Vremenska zavisnost sračunate vrednosti zakošenja, s_{rac} , prikazana je na slici 3.42.

Pretovarni most se izvesno vreme kretao između dva para markera i regulator zakošenja je zakošenje (s_{rac}) sveo na vrednost od 0 cm, odnosno u skladu sa ranijom analizom na opseg ± 407 . U trenutku $t \approx 0.1$ s induktivni davači 2IPS3 i 2IPS4 postali su neaktivni, odnosno prešli su preko pripadajućih markera. Izvršena je kompenzacija spoljašnjih poremećaja. Sračunata vrednost zakošenja sada je jednaka stvarnom zakošenju i ima vrednost $s_{rac} = -2$ cm, odnosno u skladu sa ranijom analizom sračunata vrednost zakošenja je u opsegu $-(816 \div 1223)$. Znak “minus” znači da, u odnosu na smer kretanja pretovarnog mosta, pendel noga zaostaje u odnosu na krutu nogu.

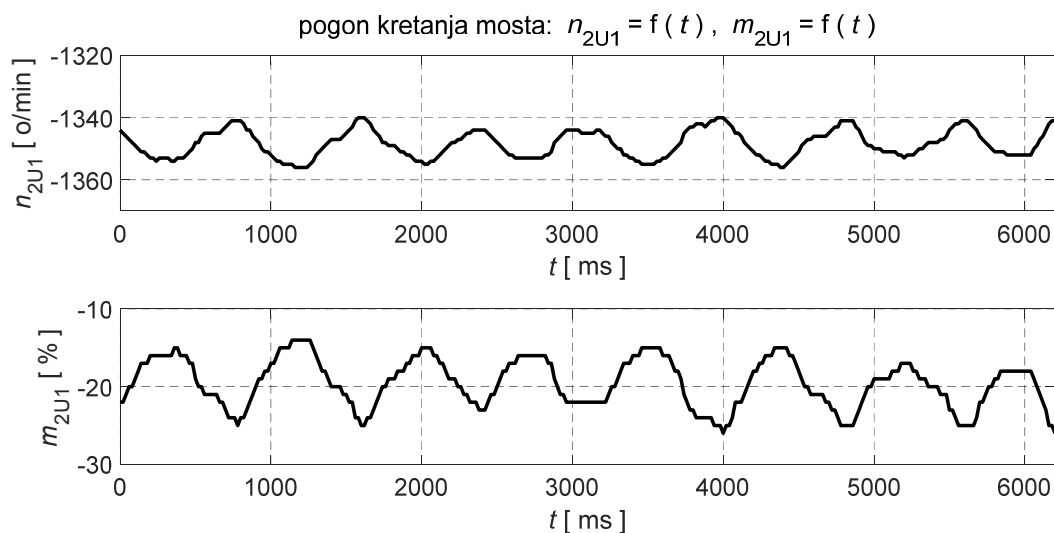
Znači, pri kretanju pretovarnog mosta između dva para markera regulator zakošenja je zakošenje (s_{rac}) sveo na vrednost od 0 cm. Međutim, usled različitih spoljašnjih uticaja na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera, 2E3 i 2E4, sračunata vrednost zakošenja od stvarnog zakošenja razlikuje se za -2 cm. Ta razlika se kompenzuje pri prelasku induktivnih davača 2IPS3 i 2IPS4 preko pripadajućih markera ($t \approx 0.1$ s).

Nakon trenutka $t \approx 0.1$ s regulator zakošenja zadatu vrednost brzine obrtanja pogona, $n^* = n_{2U1}^*$, koriguje u cilju smanjenja zakošenja i prosleđuje frekvencijskom pretvaraču 2U2 kao zadatu vrednost brzine obrtanja, n_{2U2}^* . Imajući u vidu da pendel noga zaostaje u odnosu na krutu nogu, treba da važi $n_{2U2}^* > n_{2U1}^*$. Analizom slike 3.41 jasno je da se razlika brzina obrtanja motora $n_{2U1}-n_{2U2}$ menja u granicama od oko -22 o/min do 10 o/min, dok je srednja vrednost sigurno manja od nule, a u skladu sa prethodnim zaključkom.

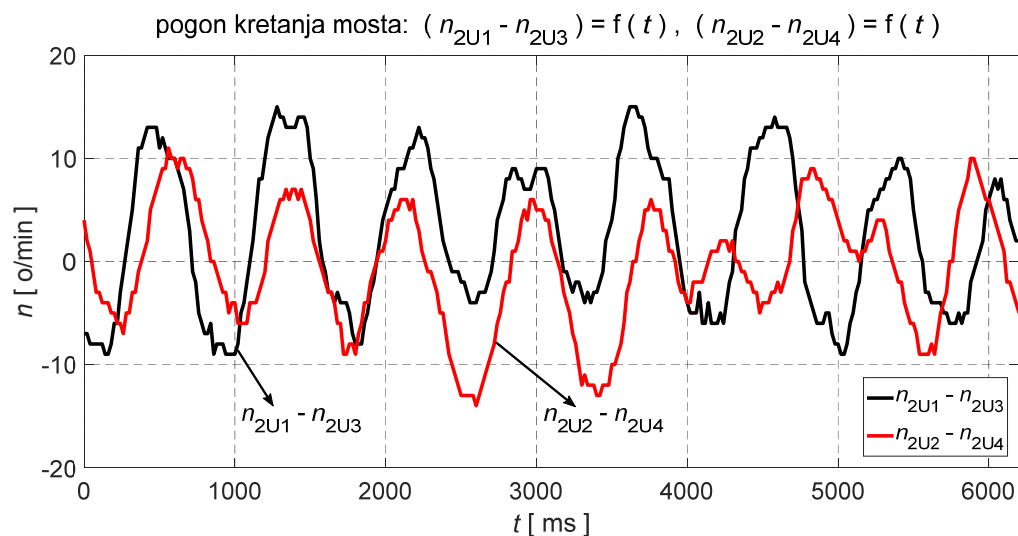
Kao posledica rada regulatora zakošenja, u trenutku $t \approx 3.3$ s zakošenje se smanjuje, a sračunata vrednost zakošenja ima vrednost $s_{rac} = -1$ cm, odnosno u skladu sa ranijom analizom sračunata vrednost zakošenja je u opsegu $-(408 \div 815)$. Imajući u vidu da pendel noga zaostaje u odnosu na krutu nogu, treba da važi $n_{2U2}^* > n_{2U1}^*$. Analizom slike 3.41 jasno je da se razlika brzina obrtanja motora $n_{2U1}-n_{2U2}$ menja u granicama od oko -16 o/min do 2 o/min, dok je srednja vrednost sigurno manja od nule, a u skladu sa prethodnim zaključkom.

Na slikama 3.43 do 3.47 prikazane su karakteristične vremenske zavisnosti za pogon kretanja mosta, a za smer kretanja od kose trake (slike 3.12 i 3.17) koji je usvojen kao negativan smer kretanja.

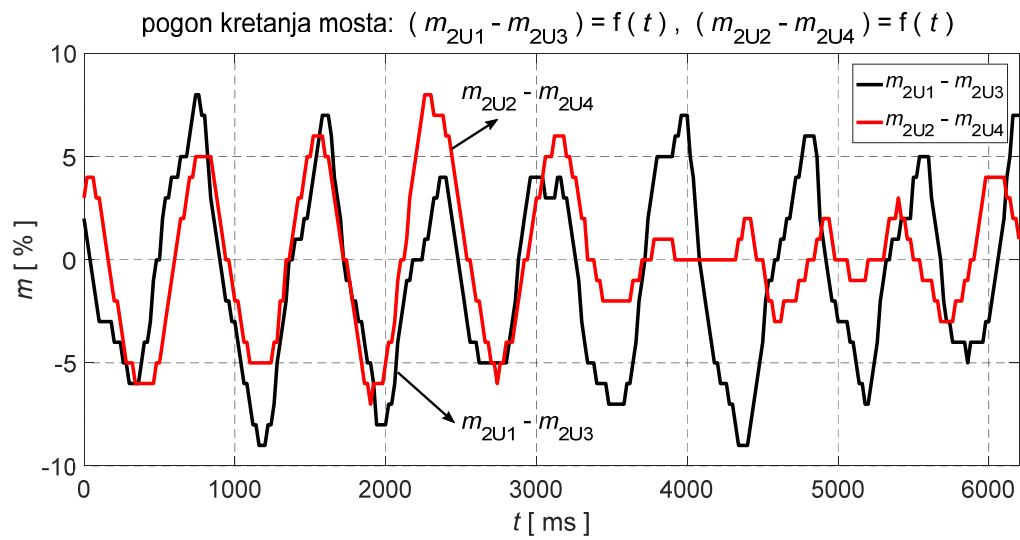
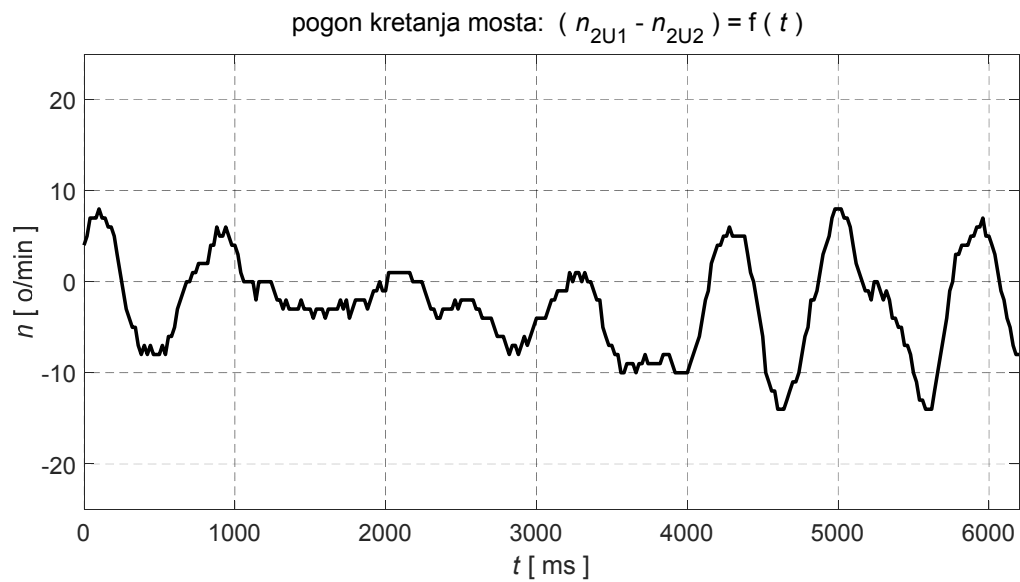
Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 2U1, $n^* = n_{2U1}^*$, i ima vrednost -1350 o/min. Za frekvencijski pretvarač 2U2, zadata vrednost brzine obrtanja dobija se iz regulatora zakošenja i iznosi n_{2U2}^* . Za frekvencijske pretvarače 2U3 i 2U4, zadate vrednosti brzine obrtanja dobijaju se iz pripadajućih regulatora raspodele opterećenja i iznose n_{2U3}^* i n_{2U4}^* , respektivno.

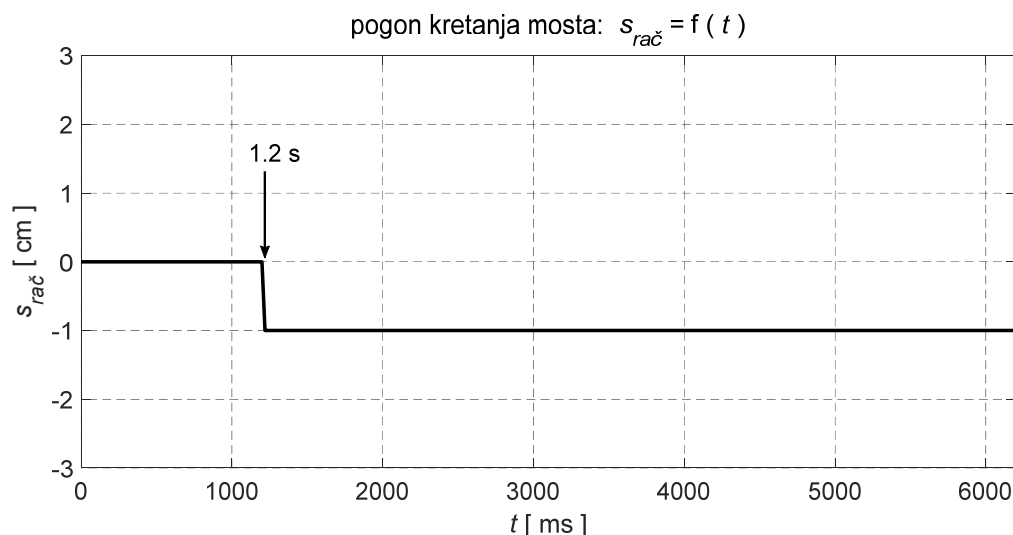


Slika 3.43. Pogon kretanja mosta, smer kretanja od kose trake: n_{2U1} i m_{2U1}



Slika 3.44. Pogon kretanja mosta, smer kretanja od kose trake: $n_{2U1} - n_{2U3}$ i $n_{2U2} - n_{2U4}$

Slika 3.45. Pogon kretanja mosta, smer kretanja od kose trake: $m_{2U1}-m_{2U3}$ i $m_{2U2}-m_{2U4}$ Slika 3.46. Pogon kretanja mosta, smer kretanja od kose trake: $n_{2U1}-n_{2U2}$

Slika 3.47. Pogon kretanja mosta, smer kretanja od kose trake: $s_{rač}$

Zadata vrednost brzine obrtanja pogona prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču 2U1, $n^* = n_{2U1}^*$, i ima vrednost -1350 o/min. Sa slike 3.43 može se zaključiti da brzina obrtanja motora n_{2U1} “dobro” prati zadatu vrednost, a da usled različitih spoljašnjih poremećaja to za posledicu ima talasnost momenta motora m_{2U1} od oko 10 % od nominalnog momenta.

Analizom slike 3.45 jasno je da se razlike momenata motora, bitne za ravnomernu raspodelu opterećenja $m_{2U1}-m_{2U3}$ i $m_{2U2}-m_{2U4}$, menjaju u uskim granicama od oko $\pm 8\%$ i $\pm 6\%$ respektivno, dok im je srednja vrednost približno jednaka nuli. Na osnovu napred navedenog nameće se zaključak da se ima ravnomerna raspodela opterećenja između motora 2M1 i 2M3 na krutoj nozi, odnosno između motora 2M2 i 2M4 na pendel nozi pretovarnog mosta. Usled različitih spoljašnjih poremećaja, ravnomerna raspodela opterećenja za posledicu ima razliku u brzinama obrtanja motora, $n_{2U1}-n_{2U3}$ i $n_{2U2}-n_{2U4}$, što se vidi sa slike 3.44. U konkretnom slučaju pogona kretanja mosta, ravnomerna raspodela opterećenja između motora na krutoj nozi i između motora na pendel nozi, pri opterećenjima bliskim nominalnim omogućava maksimalno iskorišćenje instalisane opreme, odnosno sprečava slučaj da je jedan motor preopterećen a drugi podopterećen.

Regulacija zakošenja između krute noge i pendel noge pretovarnog mosta realizovana je regulatorom zakošenja između frekvencijskih pretvarača 2U1 i 2U2, koji napajaju motore 2M1 i 2M2 (slika 3.18). Vremenska zavisnost sračunate vrednosti zakošenja, $s_{rač}$, prikazana je na slici 3.47.

Pretovarni most se izvesno vreme kretao između dva para markera i regulator zakošenja je zakošenje ($s_{rač}$) sveo na vrednost od 0 cm, odnosno u skladu sa ranijom analizom na opseg ± 407 .

U trenutku $t \approx 1.2$ s induktivni davači 2IPS3 i 2IPS4 postali su neaktivni, odnosno prešli su preko pripadajućih markera. Izvršena je kompenzacija spoljašnjih poremećaja. Sračunata vrednost zakošenja sada je jednaka stvarnom zakošenju i ima vrednost $s_{rac} = -1$ cm, odnosno u skladu sa ranijom analizom sračunata vrednost zakošenja je u opsegu $-(408 \div 815)$. Znak "minus" znači da, u odnosu na smer kretanja pretovarnog mosta, pendel noga prednjači u odnosu na krutu nogu.

Znači, pri kretanju pretovarnog mosta između dva para markera regulator zakošenja je zakošenje (s_{rac}) sveo na vrednost od 0 cm. Međutim, usled različitih spoljašnjih uticaja na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera, 2E3 i 2E4, sračunata vrednost zakošenja od stvarnog zakošenja razlikuje se za -1 cm. Ta razlika se kompenzuje pri prelasku induktivnih davača 2IPS3 i 2IPS4 preko pripadajućih markera ($t \approx 1.2$ s).

Nakon trenutka $t \approx 1.2$ s regulator zakošenja zadatu vrednost brzine obrtanja pogona, $n^* = n_{2U1}^*$, koriguje u cilju smanjenja zakošenja i prosleđuje frekvencijskom pretvaraču 2U2 kao zadatu vrednost brzine obrtanja, n_{2U2}^* . Imajući u vidu da pendel noga prednjači u odnosu na krutu nogu, a uvažavajući činjenicu da su zadate vrednosti brzina obrtanja n_{2U1}^* i n_{2U2}^* manje od nule, treba da važi $n_{2U2}^* > n_{2U1}^*$. Analizom slike 3.46 jasno je da se razlika brzina obrtanja motora n_{2U1} - n_{2U2} menja u granicama od oko -13 o/min do 8 o/min, dok je srednja vrednost sigurno manja od nule, a u skladu sa prethodnim zaključkom.

Na slikama 3.38 do 3.47 prikazane su vremenske zavisnosti brzine obrtanja motora 2M1, momenta motora 2M1, sračunate vrednosti zakošenja, kao i razlike brzina obrtanja motora i razlike momenata motora bitne za algoritam za regulaciju zakošenja i ravnomernu raspodelu opterećenja u pogonu kretanja mosta čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.18. Ravnomerna raspodela opterećenja detaljno je analizirana pri utvrđivanju performansi pogona kretanja kolica pa je, iz tog razloga, kod pogona kretanja mosta akcenat stavljen na utvrđivanju performansi regulacije zakošenja. Takođe, imajući u vidu da je konstrukcija mosta elastična, te da može biti narušena stabilnost konstrukcije kada zakošenje premaši kritičnu vrednost, odnosno da konstrukcija mosta može da spadne sa šina, navedene vremenske zavisnosti snimljene su samo sa uključenim regulatorom zakošenja, a za dva karakteristična slučaja.

Pri radu pogona sa uključenim regulatorima raspodele opterećenja razlike momenata motora, bitne za ravnomernu raspodelu opterećenja, menjaju se u uskim granicama, dok im je srednja vrednost približno jednaka nuli. Jasno je da se ima ravnomerna raspodela opterećenja između motora na krutoj nozi i između motora na pendel nozi pretovarnog mosta. Kao posledica rada regulatora raspodele opterećenja, a usled različitih spoljašnjih poremećaja, može da se javi znatna razlika u brzinama obrtanja motora, koja se u cilju stabilnog rada pogona ograničava limiterom. U konkretnom slučaju pogona kretanja mosta, ravnomerna raspodela opterećenja između motora na

krutoj nozi i između motora na pendel nozi, pri opterećenjima bliskim nominalnim omogućava maksimalno iskorišćenje instalisane opreme, odnosno sprečava slučaj da jedan motor bude preopterećen a drugi podopterećen.

Pri radu pogona sa uključenim regulatorom zakošenja sračunata vrednost zakošenja menja se u uskim granicama, daleko manjim od maksimalno dozvoljenog zakošenja. Takođe, jasno je da se kao posledica rada regulatora zakošenja, sračunata vrednost zakošenja smanjuje. S obzirom da sračunata vrednost zakošenja može da se razlikuje od stvarnog zakošenja usled različitih spoljašnjih uticaja na razliku apsolutnih pozicija dva enkodera, posebna pažnja je posvećena analizi rada kompenzatora spoljašnjih poremećaja. Jasno je da se pri prelasku induktivnih davača preko pripadajućih markera ima kompenzacija svih spoljašnjih poremećaja. Kao posledica rada regulatora zakošenja, a usled različitih spoljašnjih poremećaja, može da se javi znatna razlika u brzinama obrtanja motora, koja se u cilju stabilnog rada pogona ograničava limiterom. U konkretnom slučaju pogona kretanja mosta, a imajući u vidu da je konstrukcija mosta elastična, te da može biti narušena stabilnost konstrukcije kada zakošenje premaši kritičnu vrednost, odnosno da konstrukcija mosta može da spadne sa šina, izuzetno je važno da zakošenje ne premaši vrednost maksimalno dozvoljenog zakošenja. Zbog toga je neophodna primena regulatora zakošenja.

Imajući u vidu napred navedeno, kao i eksperimentalne rezultate priložene na slikama 3.38 do 3.47, nameće se zaključak da je u regulisanom višemotornom pogonu kretanja mosta neophodna primena algoritam za regulaciju zakošenja i ravnomernu raspodelu opterećenja, kao i da primenjeni algoritam čija je principijelna blok šema prikazana na slici 3.18 ima zadovoljavajuće performanse.

4. Pogon kabl-bubnja

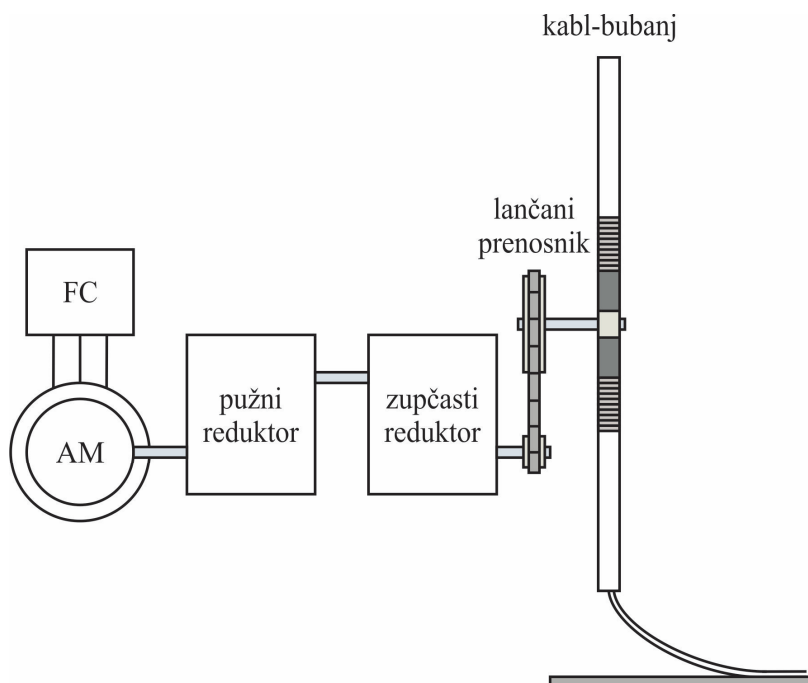
Pokretni kranovi sa dugom kranskom stazom za napajanje, a nekad i za prenos podataka sa spoljnjim svetom, najčešće koriste fleksibilne kablove. Da bi pri kretanju kрана napajanje fleksibilnim kablom bilo moguće, neophodan je sistem za namotavanje i odmotavanje kabla čija je brzina obrtanja sinhronizovana sa translatornom brzinom kretanja kрана. Taj sistem se naziva pogon kabl-bubnja. Projektovanje pogona kabl-bubnja nije jednostavno i zavisi od mnogo faktora, od kojih je ne mali broj promenljiv pri kretanju kрана, a samim tim i u vremenu, i to u širokom opsegu (npr. spoljašnji prečnik namotanog kabla, moment inercije kabla na kabl-bubnju, brzina obrtanja kabl-bubnja, moment kabl-bubnja). Takođe, kod kabl-bubnja uvek je osnovni zahtev održavanje konstantne sile zatezanja kabla, što omogućava ravnomerno namotavanje, odnosno odmotavanje kabla. Napred navedeno znatno komplikuje izbor motora za pokretanje pogona kabl-bubnja i ima veliki uticaj na izbor adekvatnog algoritma upravljanja.

U ovom poglavlju detaljno je analiziran pogon kabl-bubnja za namotavanje, odnosno odmotavanje napojnog kabla pokretnog kрана, kod kojeg se kabl-bubanj pokreće trofaznim asinhronim motorom napajanim iz frekvencijskog pretvarača, a kabl na kabl-bubnju namotava u jednom sloju (monospiralni kabl-bubanj). Izložen je detaljan matematički model pogona monospiralnog kabl-bubnja sa stanovišta mehaničke konstrukcije, koji je, nakon kompleksne analize uprošćen, a u cilju formiranja inženjerski primenljivog rešenja za izbor pogonskog motora. Takođe, nakon detaljne analize mehaničke konstrukcije i analize rada pogona kabl-bubnja, predložen je algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja, koji se bazira na upravljanju po momentu bez davanja sile zatezanja kabla, odnosno na indirektnoj regulaciji sile zatezanja. Verifikacije matematičkog modela, nove metode za izbor pogonskog motora i predloženog algoritma upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja realizovane su korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004.

Takođe, u ovom poglavlju opisana je praktična realizacija nove metode za izbor pogonskog motora i predloženog algoritma upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja kod Derik kрана DK004. U cilju utvrđivanja performansi, prezentovane su eksperimentalno snimljene vremenske zavisnosti karakterističnih veličina.

4.1. Mehanika pogona kabl-bubnja

Uloga pogona kabl-bubnja pri kretanju kрана je namotavanje, odnosno odmotavanje napojnog (ili signalnog) kabla kрана, a u zavisnosti od smera kretanja kрана i od položaja priključnog mesta. Primer principijelne blok šeme pogona kabl-bubnja prikazan je na slici 4.1.

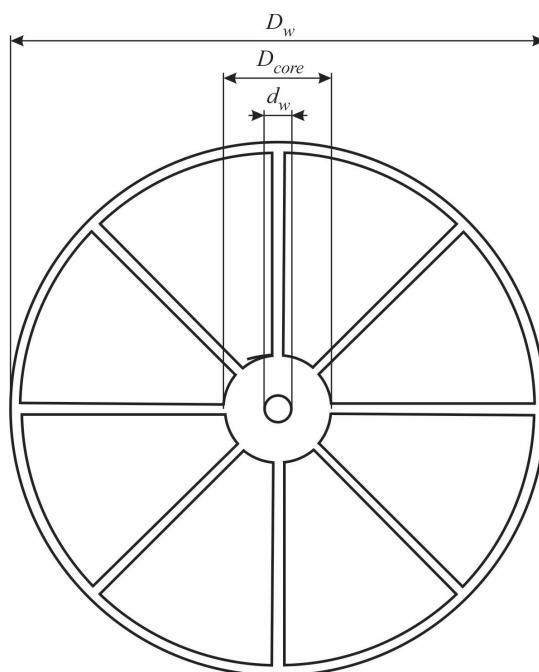


Slika 4.1. Primer principijelne blok šeme pogona kabl-bubnja

Kabl-bubanj se pokreće trofaznim asinhronim motorom (AM), a posredstvom pužnog reduktora, zupčastog reduktora i lančanog prenosnika, respektivno. Asinhroni motor se napaja iz frekvencijskog pretvarača (FC).

Sa aspekta mehanike pogona kabl-bubnja, bitni podaci za matematičku analizu su moment inercije trofaznog asinhronog motora, J_m , pužnog reduktora, J_{pr} , zupčastog reduktora, J_{zr} , i lančanog prenosnika, J_{lp} , kao i prenosni odnos i stepen korisnog dejstva pužnog reduktora, I_{pr} i η_{pr} , zupčastog reduktora, I_{zr} i η_{zr} , i lančanog prenosnika, I_{lp} i η_{lp} , respektivno. Navedeni podaci su kataloški za datu opremu.

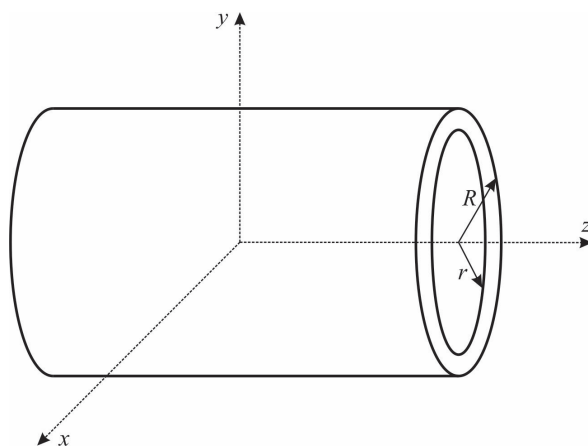
Šematski prikaz kabl-bubnja sa bitnim geometrijskim podacima dat je na slici 4.2.



Slika 4.2. Šematski prikaz kabl-bubnja sa bitnim geometrijskim podacima

Spoljašnji prečnik kabl-bubnja je D_w , a unutrašnji prečnik je d_w . Prečnik jezgra, oko koga se namotava kabl, je D_{core} . Kabl-bubanj ima masu M_w i stepen korisnog dejstva η_w .

Moment inercije kabl-bubnja, J_w , biće određen pod pretpostavkom da kabl-bubanj može da se smatra šupljim valjkom. Šuplji valjak, spoljašnjeg poluprečnika R i unutrašnjeg poluprečnika r , prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Šuplji valjak

Pri rotaciji šupljeg valjka oko z -ose, što odgovara slučaju kabl-bubnja, njegov moment inercije, J_z , može da se odredi korišćenjem poznatog izraza:

$$J_z = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R^2 + r^2), \quad (4.1)$$

gde je M masa šupljeg valjka.

Izraz za moment inercije 4.1, primenjen na kabl-bubanj sa slike 4.2, može da se napiše u obliku:

$$J_w = \frac{1}{2} \cdot M_w \cdot \left[\left(\frac{D_w}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_w}{2} \right)^2 \right] = \frac{1}{8} \cdot M_w \cdot (D_w^2 + d_w^2). \quad (4.2)$$

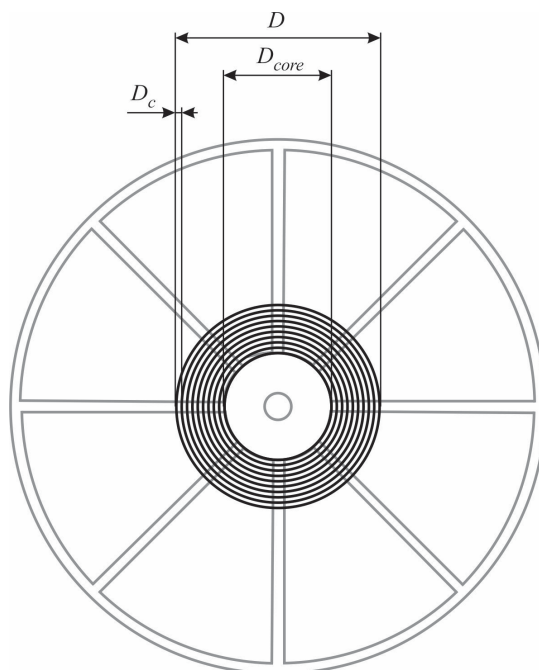
Neka se na kabl-bubanj namotava kabl spoljašnjeg prečnika D_c , podužne mase $M_{c,l}$ i maksimalno dopuštene statičke sile zatezanja kabla $F_{c,max}$.

Pri namotavanju/odmotavanju kabla na kabl-bubanj menja se ukupna masa kabl-bubnja, a samim tim i ukupan moment inercije. Ukupan moment inercije kabl-bubnja, J_t , iznosi:

$$J_t = J_w + J_c, \quad (4.3)$$

gde je J_c moment inercije kabla na kabl-bubnju.

Šematski prikaz kabla na kabl-bubnju dat je na slici 4.4.



Slika 4.4. Šematski prikaz kabla na kabl-bubnju

Moment inercije kabla na kabl-bubnju, J_c , biće određen pod pretpostavkom da kabl na kabl-bubnju može da se smatra šupljim valjkom, u skladu sa slikom 4.4, a korišćenjem izraza 4.1.

$$J_c = \frac{1}{8} \cdot M_c \cdot (D^2 + D_{core}^2), \quad (4.4)$$

gde su: M_c - masa namotanog kabla,

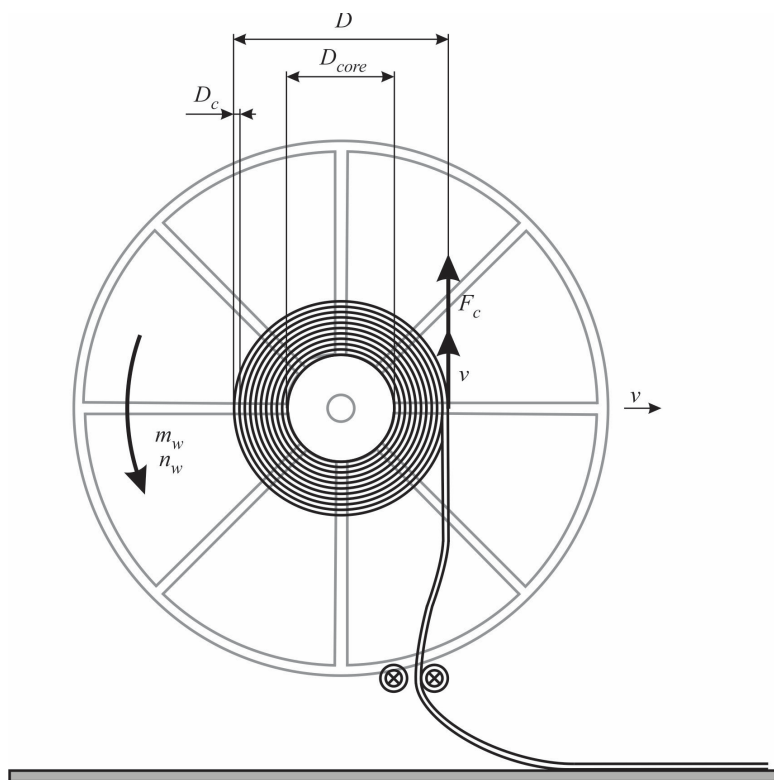
D - spoljašnji prečnik namotanog kabla.

Masa namotanog kabla iznosi:

$$M_c = M_{c,l} \cdot L_c, \quad (4.5)$$

gde je L_c dužina namotanog kabla.

Šematski prikaz namotavanja/odmotavanja kabla na kabl-bubanj dat je na slici 4.5.



Slika 4.5. Šematski prikaz namotavanja/odmotavanja kabla na kabl-bubanj

U cilju sprečavanja oscilacija kabl-bubnja, a samim tim i dela kabla između kabl-bubnja i podloge po kojoj se kabl polaže, najoptimalnije rešenje sa stanovišta regulacije je da kabl na kabl-bubnju tokom kretanja kрана sve vreme bude zategnut konstantnom silom (F_c na slici 4.5). U tom slučaju, analizom slike 4.5 može se zaključiti da je linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla, v , jednaka brzini kretanja kрана. Imajući to u vidu, dužina namotanog kabla mora da bude

jednaka pređenom putu kрана u odnosu na referentnu tačku u kojoj je dužina namotanog kabla jednaka nuli:

$$L_c = \int v \cdot dt . \quad (4.6)$$

Ukoliko se umesto brzine kretanja kрана meri brzina obrtanja asinhronog motora za pogon kabl-bubnja, n_m , linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla, v , može da se odredi na sledeći način:

$$v = \omega_w \cdot \frac{D}{2} = n_w \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{D}{2} = n_m \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{D}{2} , \quad (4.7)$$

gde su: ω_w - brzina obrtanja kabl-bubnja u rad/s,

n_w - brzina obrtanja kabl-bubnja u o/min,

$I_t = I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp}$ - ukupan prenosni odnos od asinhronog motora do kabl-bubnja.

Spoljašnji prečnik namotanog kabla, D , na osnovu slika 4.4 i 4.5, može da se odredi na sledeći način:

$$D = D_{core} + 2 \cdot k \cdot D_c , \quad (4.8)$$

gde je k broj namota kabla na kabl-bubnju.

Broj namota kabla na kabl-bubnju, k , može da se odredi na osnovu dužine namotanog kabla, L_c , pri čemu je dužina namotanog kabla, na osnovu slike 4.5, jednaka:

$$\begin{aligned} L_c &= 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{core}+2 \cdot 1 \cdot D_c}{2} + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{core}+2 \cdot 2 \cdot D_c}{2} + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{core}+2 \cdot 3 \cdot D_c}{2} + \dots + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{core}+2 \cdot k \cdot D_c}{2} , \\ L_c &= \pi \cdot [D_{core} + 2 \cdot 1 \cdot D_c + D_{core} + 2 \cdot 2 \cdot D_c + D_{core} + 2 \cdot 3 \cdot D_c + \dots + D_{core} + 2 \cdot k \cdot D_c] , \\ L_c &= \pi \cdot [k \cdot D_{core} + 2 \cdot (1 + 2 + 3 + \dots + k) \cdot D_c] , \\ L_c &= \pi \cdot \left[k \cdot D_{core} + 2 \cdot \frac{k \cdot (k+1)}{2} \cdot D_c \right] . \end{aligned}$$

Konačno, izraz za dužinu namotanog kabla može da se napiše u obliku:

$$L_c = \pi \cdot [k \cdot D_{core} + k \cdot (k + 1) \cdot D_c] . \quad (4.9)$$

Rešavanjem jednačine 4.9 po broju namota kabla na kabl-bubnju, k , ima se:

$$\begin{aligned} \frac{L_c}{\pi} &= k \cdot D_{core} + k \cdot (k + 1) \cdot D_c , \\ D_c \cdot k^2 + (D_{core} + D_c) \cdot k - \frac{L_c}{\pi} &= 0 , \\ k_{1/2} &= \frac{-(D_{core}+D_c) \pm \sqrt{(D_{core}+D_c)^2 + 4 \cdot D_c \cdot \frac{L_c}{\pi}}}{2 \cdot D_c} . \end{aligned}$$

S obzirom da broj namota kabla na kabl-bubnju mora da bude pozitivan realan broj, uvek se uzima rešenje prethodne kvadratne jednačine sa znakom “+”, pa sledi:

$$k = \frac{-(D_{core}+D_c) + \sqrt{(D_{core}+D_c)^2 + 4 \cdot D_c \cdot \frac{L_c}{\pi}}}{2 \cdot D_c} . \quad (4.10)$$

U skladu sa izrazom 4.4, a imajući u vidu izloženu analizu, može se zaključiti da se moment inercije kabla na kabl-bubnju, J_c , menja u toku vremena, a kao posledica kretanja kрана.

Zadata vrednost sile zatezanja kabla, $F_{c,z}$, koja je prikazana na slici 4.5, određuje se eksperimentalno pri puštanju pogona u rad, a na osnovu željene dužine kabla u vazduhu između kabl-bubnja i podloge. Njena vrednost može i da se proceni na osnovu željene dužine kabla u vazduhu, a pod pretpostavkom da pri kretanju kabla između kabl-bubnja i podloge nema gubitaka:

$$F_{c,z} = M_{c,l} \cdot L_{c,v} \cdot g, \quad (4.11)$$

gde su: $L_{c,v}$ - željena dužina kabla u vazduhu,

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad - \quad \text{ubrzanje zemljine teže.}$$

Za željenu dužinu kabla u vazduhu, $L_{c,v}$, zadata vrednost sile zatezanja kabla mora da bude manja od maksimalno dopuštene statičke sile zatezanja kabla, $F_{c,z} < F_{c,\text{max}}$.

Pri konstantnoj sili zatezanja kabla, $F_{c,z}$, i pri konstantnoj brzini kretanja kрана, koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja/odmotavanja kabla, v , ima se i konstantna snaga zatezanja kabla, P_w :

$$P_w = F_{c,z} \cdot v. \quad (4.12)$$

Sa stanovišta rotacionog kretanja kabl-bubnja, konstantna snaga zatezanja kabla može da se izrazi na sledeći način:

$$P_w = m_w \cdot \omega_w, \quad (4.13)$$

gde je m_w moment kabl-bubnja.

Moment kabl-bubnja, m_w , pri konstantnoj sili zatezanja kabla, $F_{c,z}$, a na osnovu slike 4.5, jednak je:

$$m_w = F_{c,z} \cdot \frac{D}{2}. \quad (4.14)$$

Brzina obrtanja kabl-bubnja, n_w , pri konstantnoj brzini kretanja kрана, v , a na osnovu izraza 4.7, jednaka je:

$$n_w = \omega_w \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} = v \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}. \quad (4.15)$$

Zavisnost momenta kabl-bubnja, m_w , od brzine obrtanja kabl-bubnja, n_w , može se dobiti na osnovu izraza 4.14 i 4.7:

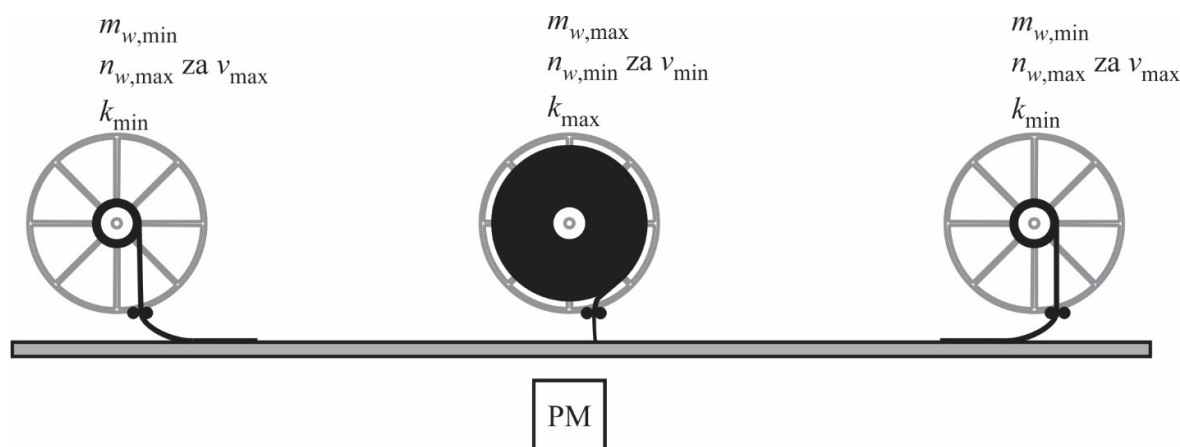
$$m_w = F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} = F_{c,z} \cdot v \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{1}{n_w}. \quad (4.16)$$

Analizom izraza 4.16 može se zaključiti da je, pri konstantnoj sili zatezanja kabla, $F_{c,z}$, i pri konstantnoj brzini kretanja kрана, v , moment kabl-bubnja obrnuto proporcionalan brzini obrtanja kabl-bubnja:

$$m_w \propto \frac{1}{n_w}. \quad (4.17)$$

Neka se kran kreće kranskom stazom i to levo i desno u odnosu na kabinu dizaličara. Brzina kretanja kрана, v , je konstantna i može imati jednu od unapred zadatih vrednosti između v_{\min} i v_{\max} .

Karakteristični položaji pri kretanju kрана, u kojima se imaju maksimalne i minimalne brzine i momenti kabl-bubnja, su krajnje levi i krajnje desni položaj u odnosu na priključno mesto (PM) i pored priključnog mesta. Karakteristični položaji kрана prikazani su na slici 4.6.



Slika 4.6. Karakteristični položaji kрана

U krajnje levom i krajnje desnom položaju kрана u odnosu na priključno mesto, odnosno na krajevima kranske staze, moment kabl-bubnja je minimalan, $m_{w,\min}$, u skladu sa izrazom 4.14. Brzina obrtanja kabl-bubnja, pri maksimalnoj brzini kretanja kрана, v_{\max} , je maksimalna, $n_{w,\max}$, u skladu sa izrazom 4.15. Takođe, na krajevima kranske staze, uvek je zahtev da se na kabl-bubnju ima nekoliko namota kabla, k_{\min} .

Pri položaju kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze, moment kabl-bubnja je maksimalan, $m_{w,\max}$, u skladu sa izrazom 4.14. Brzina obrtanja kabl-bubnja, pri

minimalnoj brzini kretanja kрана, v_{\min} , je minimalna, $n_{w, \min}$, u skladu sa izrazom 4.15. Takođe, pored priključnog mesta, na kabl-bubnju ima se maksimalan broj namota kabla, k_{\max} .

Nezavisno od položaja kрана, pri konstantnoj sili zatezanja kabla, $F_{c,z}$, maksimalna i minimalna snaga zatezanja kabla, $P_{w, \max}$ i $P_{w, \min}$, imaju se pri maksimalnoj i minimalnoj brzini kretanja kрана, v_{\max} i v_{\min} , respektivno, a u skladu sa izrazom 4.12.

4.1.1. Moment, brzina i snaga asinhronog motora za pogon kabl-bubnja

Asinhroni motor, kojim se kabl-bubanj pokreće, na svom vratilu mora da razvije moment motora, m_m , koji će da obezbedi zadatu vrednost sile zatezanja kabla. To znači da moment motora treba da odgovara momentu kabl-bubnja, m_w , uz uvažavanje gubitaka u pogonu i dinamike pogona.

Gubici u pogonu, za sve elemente pogona, dati su u vidu stepena korisnog dejstva, pri čemu je ukupan stepen korisnog dejstva od asinhronog motora do kabl-bubnja jednak:

$$\eta_t = \eta_{pr} \cdot \eta_{zr} \cdot \eta_{lp} \cdot \eta_w . \quad (4.18)$$

Dinamika kretanja pogona kabl-bubnja u opštem slučaju opisuje se Njutnovom jednačinom za rotaciono kretanje, $\frac{d}{dt} [J \cdot \omega] = m_{mot} - m_{opt}$. U konkretnom slučaju, dinamika kretanja motora, pužnog reduktora, zupčastog reduktora, lančanog prenosnika i kabl-bubnja, svedena na vratilo motora, a u skladu sa slikom 4.7, može da se opiše dinamičkim komponentama momenta $\frac{d}{dt} [J \cdot \omega]$, koje su date izrazima 4.19 do 4.22, respektivno:

$$\frac{d}{dt} [(J_m + J_{pr}) \cdot \omega_w \cdot I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp}] , \quad (4.19)$$

$$\frac{d}{dt} [J_{zr} \cdot \omega_w \cdot I_{zr} \cdot I_{lp}] \cdot \frac{1}{I_{pr}} , \quad (4.20)$$

$$\frac{d}{dt} [I_{lp} \cdot \omega_w \cdot I_{lp}] \cdot \frac{1}{I_{pr} \cdot I_{zr}} , \quad (4.21)$$

$$\frac{d}{dt} [J_t \cdot \omega_w] \cdot \frac{1}{I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp}} . \quad (4.22)$$

S obzirom da svi momenti inercije, izuzev ukupnog momenta inercije kabl-bubnja, J_t , imaju konstantne vrednosti, izrazi 4.19 do 4.21 mogu da se napišu u sledećem obliku:

$$I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp} \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} , \quad (4.23)$$

$$\frac{I_{zr} \cdot I_{lp}}{I_{pr}} \cdot J_{zr} \cdot \frac{d\omega_w}{dt} , \quad (4.24)$$

$$\frac{I_{lp}}{I_{pr} \cdot I_{zr}} \cdot J_{lp} \cdot \frac{d\omega_w}{dt} . \quad (4.25)$$

Takođe, ako se ima u vidu da su svi momenti inercije, izuzev ukupnog momenta inercije kabl-bubnja, J_t , veličine istog reda, važi:

$$I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp} \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} \gg \frac{I_{zr} \cdot I_{lp}}{I_{pr}} \cdot J_{zr} \cdot \frac{d\omega_w}{dt} , \frac{I_{lp}}{I_{pr} \cdot I_{zr}} \cdot J_{lp} \cdot \frac{d\omega_w}{dt} . \quad (4.26)$$

To znači da uticaj dinamike zupčastog reduktora i lančanog prenosnika na dinamiku pogona može da se zanemari.

Izvod po vremenu iz izraza 4.22 može da se napiše u sledećem obliku:

$$\frac{d}{dt} [J_t \cdot \omega_w] = J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \omega_w \cdot \frac{dJ_t}{dt}. \quad (4.27)$$

S obzirom da moment inercije kabl-bubnja ima konstantnu vrednost, a da se moment inercije kabla na kabl-bubnju sporo menja u toku vremena, u skladu sa izrazom 4.3, jasno je da važi:

$$J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} \gg \omega_w \cdot \frac{dJ_t}{dt}. \quad (4.28)$$

Imajući u vidu napred navedeno, izraz 4.22 dobija oblik:

$$\frac{1}{I_{pr} \cdot I_{zr} \cdot I_{lp}} \cdot J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt}. \quad (4.29)$$

Na kraju, može se zaključiti da dinamika pogona, sa dovoljnom tačnošću, može da se opiše izrazima 4.23 i 4.29. Ovi izrazi mogu da se napišu i na sledeći način:

$$I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt}, \quad (4.30)$$

$$\frac{1}{I_t} \cdot J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt}. \quad (4.31)$$

Na osnovu prethodno izloženog, Njutnova jednačina za pogon kabl-bubnja, svedena na vratilo motora, koja uvažava gubitke u pogonu i dinamiku pogona, pri čemu gubitke u pogonu “pokriva” motor, oblika je:

$$I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \frac{1}{I_t} \cdot J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} \cdot \frac{1}{\eta_t} = m_m - \frac{1}{I_t} \cdot m_w \cdot \frac{1}{\eta_t}. \quad (4.32)$$

Moment motora, m_m , izražen iz jednačine 4.32, jednak je:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t}. \quad (4.33)$$

Zamenom izraza 4.14 u 4.33, dobija se:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t}. \quad (4.34)$$

Zatim, zamenom izraza 4.7 u 4.34, ima se:

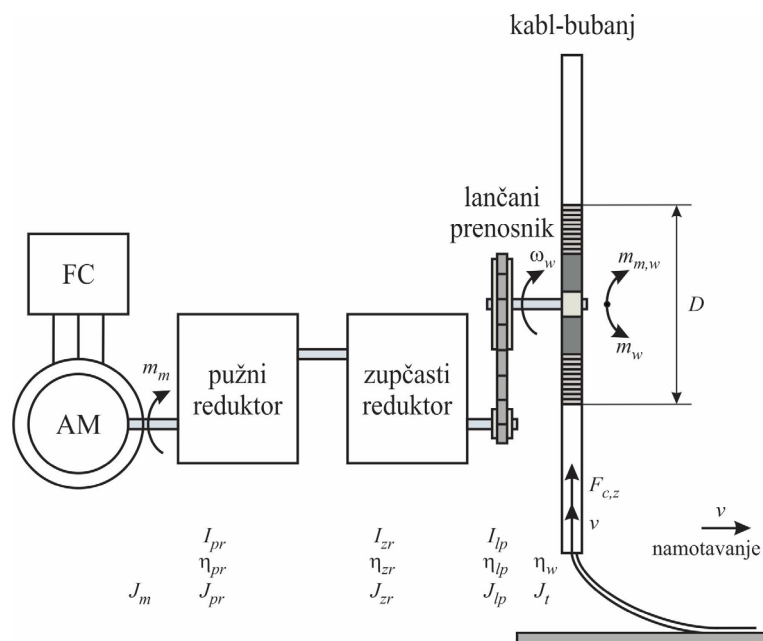
$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d}{dt} \left[v \cdot \frac{2}{D} \right] + \left\{ J_t \cdot \frac{d}{dt} \left[v \cdot \frac{2}{D} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t}. \quad (4.35)$$

Konačno, kada se sračuna izvod po vremenu, izraz za moment motora može da se napiše na sledeći način:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t}. \quad (4.36)$$

U izrazu 4.36 su, pri radu sa konstantnom silom zatezanja kabla, uvek vremenski promenjive veličine spoljašnji prečnik namotanog kabla, D , i ukupan moment inercije kabl-bubnja, J_t . Takođe, pri zaletanju i kočenju pogona, vremenski promenjiva veličina je i linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla, v .

Jednačine 4.32 do 4.36 odgovaraju slučaju kada se momentu motora, m_m , suprotstavlja moment kabl-bubnja, m_w , što se ima pri namotavanju kabla, a ilustrovano je na slici 4.7. Usvojeno je da se, u motornom režimu rada pogona pri namotavanju kabla, imaju pozitivne vrednosti momenta motora i brzine obrtanja motora. Takođe, pri namotavanju kabla, usvojeno je da su brzina obrtanja kabl-bubnja i linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla pozitivne. S obzirom da se smer sile zatezanja kabla ne menja, moment kabl-bubnja uvek ima pozitivnu vrednost.



Slika 4.7. Principijelna blok šema pogona kabl-bubnja – namotavanje kabla

Jednačine 4.32 do 4.36 važe pri namotavanju kabla, u kvazistacionarnom stanju, pri konstantnoj brzini kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja kabla, i u tom slučaju je:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} \text{ malo manje od } 0 & \quad \text{i} \quad J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0 \\ \frac{dv}{dt} = 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo veće od } 0 & \quad \text{i} \quad J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0. \end{aligned} \quad (4.37)$$

Takođe, ove jednačine važe i pri zaletanju kрана odnosno pogona kabl-bubnja, kada je:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} > 0 & \quad \text{i} \quad J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0 \\ \frac{dv}{dt} > 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo veće od } 0 & \quad \text{i} \quad J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0. \end{aligned} \quad (4.38)$$

U navedenim slučajevima, ima se motorni režim rada, energija se “kreće” od motora ka kabl-bubnju, a gubitke u pogonu “pokriva” motor, što je uvaženo članom $\frac{1}{\eta_t}$ u jednačinama.

Pri kočenju kрана, odnosno pogona kabl-bubnja, važi:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} < 0 \\ \frac{dv}{dt} < 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo veće od } 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

i može da se desi da pogon iz motornog pređe u generatorski režim rada, a da se energija “kreće” od kabl-bubnju ka motoru, što se ima pri:

$$\begin{aligned} J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w < 0 \\ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} < 0. \end{aligned} \quad (4.40)$$

U tom slučaju gubitke u pogonu “pokriva” kabl-bubanj, a u jednačinama 4.32 do 4.36 član $\frac{1}{\eta_t}$ treba da se zameni članom η_t . Na primer, jednačina 4.33 imaće sledeći oblik:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \eta_t. \quad (4.41)$$

Da bi jednačine 4.32 do 4.36 bile primenjive u svim režimima rada pri namotavanju kabla, član $\frac{1}{\eta_t}$ treba da se zameni članom $\frac{1}{\eta_t^{rr}}$, gde je rr režim rada pogona kabl-bubnja, koji može da se odredi na jedan od dva navedena načina:

$$\begin{aligned} rr &= \text{sign} \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) = \frac{J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w}{|J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w|} \\ rr &= \text{sign} \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} = \frac{J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2}}{|J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2}|}. \end{aligned} \quad (4.42)$$

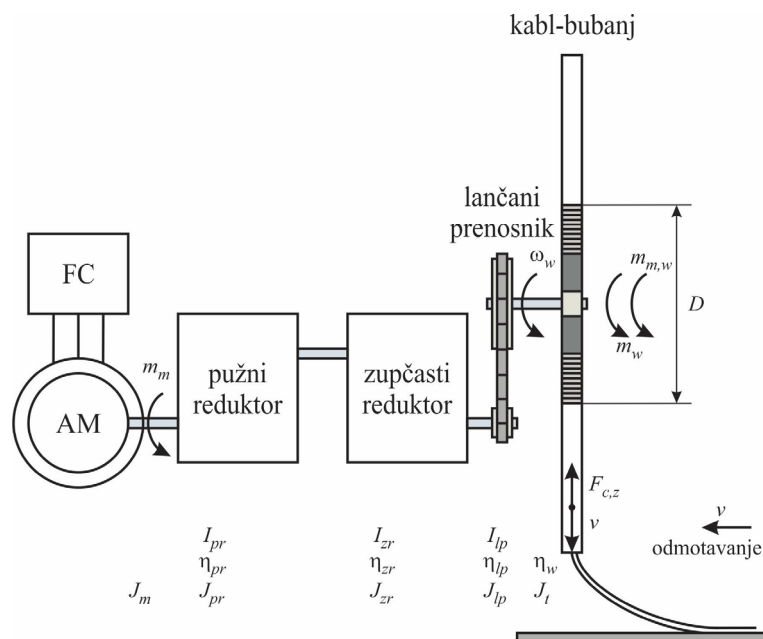
U skladu sa izrazom 4.42, režim rada pogona kabl-bubnja može da ima jednu od sledećih vrednosti:

$$rr = \begin{cases} 1 & , \text{ za } J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0 \text{ tj. } J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0 \\ 0 & , \text{ za } J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w = 0 \text{ tj. } J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} = 0 \\ -1 & , \text{ za } J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w < 0 \text{ tj. } J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} < 0 \end{cases} \quad (4.43)$$

Sada će, jednačina 4.33 na primer, imati sledeći oblik:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rr}}. \quad (4.44)$$

Slučaj kada moment motora, m_m , i moment kabl-bubnja, m_w , deluju u istom smeru ima se pri odmotavanju kabla, a ilustrovan je na slici 4.8. Usvojeno je da se, u motornom režimu rada pogona pri odmotavanju kabla, imaju negativne vrednosti momenta motora i brzine obrtanja motora. Takođe, pri odmotavanju kabla, usvojeno je da su brzina obrtanja kabl-bubnja i linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla negativne.



Slika 4.8. Principijelna blok šema pogona kabl-bubnja – odmotavanje kabla

Pri odmotavanju kabla, u kvazistacionarnom stanju, pri konstantnoj brzini kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini odmotavanja kabla, važi:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} \text{ malo manje od } 0 & \quad i \quad J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0 \\ \frac{dv}{dt} = 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo manje od } 0 & \quad i \quad J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Takođe, pri kočanju kрана odnosno pogona kabl-bubnja, važi:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} > 0 & \quad i \quad J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0 \\ \frac{dv}{dt} > 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo manje od } 0 & \quad i \quad J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0. \end{aligned} \quad (4.46)$$

U navedenim slučajevima, ima se generatorski režim rada, energija se “kreće” od kabl-bubnja ka motoru, a gubitke u pogonu “pokriva” kabl-bubanj. U jednačinama 4.32 do 4.36 član $\frac{1}{\eta_t}$ treba da se zameni članom η_t .

Pri zaletanju kрана, odnosno pogona kabl-bubnja, važi:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_w}{dt} < 0 \\ \frac{dv}{dt} < 0, \frac{dD}{dt} \text{ malo manje od } 0 \end{aligned} \quad (4.47)$$

i može da se desi da pogon iz generatorskog pređe u motorni režim rada, a da se energija “kreće” od motora ka kabl-bubnju, što se ima pri:

$$\begin{aligned} J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w < 0 \\ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} < 0. \end{aligned} \quad (4.48)$$

U tom slučaju gubitke u pogonu “pokriva” motor, a jednačine 4.32 do 4.36 važe.

Da bi jednačine 4.32 do 4.36 bile primenjive u svim režimima rada pri namotavanju i odmotavanju kabla, član $\frac{1}{\eta_t}$ treba da se zameni članom $\frac{1}{\eta_t^{rw}}$, gde je rw režim rada pogona kabl-bubnja pri namotavanju/odmotavanju kabla, a on može da se odredi na jedan od dva navedena načina:

$$rw = \text{sign} \left\{ \left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v \right\} = \frac{\left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v}{\left| \left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v \right|} \quad (4.49)$$

$$rw = \text{sign} \left\{ \left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v \right\} = \frac{\left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v}{\left| \left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v \right|}.$$

U skladu sa izrazom 4.49, režim rada pogona kabl-bubnja pri namotavanju/odmotavanju kabla može da ima jednu od sledećih vrednosti:

$$rw = \begin{cases} 1 & , \text{ za } \left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v > 0 \text{ tj. } \left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v > 0 \\ 0 & , \text{ za } \left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v = 0 \text{ tj. } \left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v = 0 \\ -1 & , \text{ za } \left[J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right] \cdot v < 0 \text{ tj. } \left[J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right] \cdot v < 0 \end{cases} \quad (4.50)$$

Sada će, jednačina 4.33 na primer, imati sledeći oblik:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}}. \quad (4.51)$$

Napomena: u cilju dokazivanja tvrđenja iz izraza 4.37 do 4.40 i izraza 4.45 do 4.48, u Prilogu 3 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina, dobijene korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004.

Asinhroni motor, kojim se kabl-bubanj pokreće, na svom vratilu mora da razvije brzinu obrtanja, n_m , koja treba da odgovara brzini obrtanja kabl-bubnja, n_w , odnosno linijskoj brzini namotavanja/odmotavanja kabla koja je jednaka brzini kretanja kрана, v :

$$n_m = n_w \cdot I_t = \omega_w \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot I_t = v \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot I_t. \quad (4.52)$$

U izrazu 4.52 je, pri radu sa konstantnom brzinom kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja/odmotavanja kabla, uvek vremenski promenjiva veličina spoljašnji prečnik namotanog kabla, D . Međutim, pri zaletanju i kočenju pogona, vremenski promenjiva veličina je i linijska brzina namotavanja/odmotavanja kabla, v .

U skladu sa napred navedenim, nameće se zaključak da se brzina obrtanja asinhronog motora za pogon kabl-bubnja, n_m , menja u svim režimima rada pogona kabl-bubnja pri namotavanju/odmotavanju kabla.

Asinhroni motor, kojim se kabl-bubanj pokreće, na svom vratilu mora da razvije snagu motora, P_m , koja odgovara momentu motora, m_m , i brzini obrtanja motora, n_m :

$$P_m = m_m \cdot n_m \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}. \quad (4.53)$$

Snaga motora, zamenom izraza 4.33 i 4.52 u 4.53, može da se odredi i na sledeći način:

$$P_m = \left\{ I_t^2 \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \right\} \cdot \omega_w. \quad (4.54)$$

Takođe, zamenom izraza 4.36 i 4.52 u 4.53, za snagu motora se dobija:

$$P_m = \left\{ I_t^2 \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + \right. \\ \left. + \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \right\} \cdot \frac{2}{D} \cdot v. \quad (4.55)$$

Konačno, imajući u vidu izraz 4.13, odnosno 4.12, snaga motora iz 4.54 i 4.55, respektivno, jednaka je:

$$P_m = \left[I_t^2 \cdot (J_m + J_{pr}) + J_t \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \right] \cdot \frac{d\omega_w}{dt} \cdot \omega_w + P_w \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}}, \quad (4.56)$$

$$P_m = \frac{4}{D^3} \cdot \left[I_t^2 \cdot (J_m + J_{pr}) + J_t \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \right] \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] \cdot v + P_w \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}}. \quad (4.57)$$

Analizom izraza 4.56 i 4.57 može se zaključiti da snaga motora, P_m , treba da odgovara snazi kabl-bubnja, P_w , uz uvažavanje gubitaka u pogonu i dinamike pogona.

U skladu sa napred navedenim, nameće se zaključak da se snaga asinhronog motora za pogon kabl-bubnja, P_m , menja u svim režimima rada pogona kabl-bubnja pri namotavanju/odmotavanju kabla. Takođe, snaga motora može da ima, kako pozitivne, tako i negativne vrednosti, odnosno motor može da radi i u motornom i u generatorskom režimu.

4.1.2. Primer proračuna kabl-bubnja kod Derik kрана DK004

Izložena teorijska analiza praktično je primenjena kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004. Uloga kabl-bubnja, pri kretanju Derik kрана, je namotavanje, odnosno odmotavanje glavnog napojnog kabla kрана, a u zavisnosti od smera kretanja kрана i od položaja priključnog mesta. Principijelna blok šema pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004 odgovara slici 4.1.

Poznati su sledeći podaci o pogonu kabl-bubnja na Derik kranu DK004 (kataloški podaci i podaci iz mašinskog dela tehničke dokumentacije):

- glavni napojni kabl kрана

DRUM CABLE NSHTÖU 4G95, proizvođača HELUKABEL

$$D_c = 56 \text{ mm}, M_{c,l} = 6.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}}, F_{c,\max} = 5700 \text{ N}$$

- pužni reduktor (jedan pužni par)

$$I_{pr} = 9.9, \eta_{pr} = 0.8, J_{pr} = 0.000132 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

- zupčasti reduktor (dva zupčasta para)

$$I_{zr} = 14, \eta_{zr} = 0.97^2 = 0.9409$$

- lančani prenosnik

$$I_{lp} = \frac{62}{27}, \eta_{lp} = 0.8$$

- kabl-bubanj

$$D_w = 5 \text{ m}, d_w = 0.26 \text{ m}, D_{core} = 0.8906 \text{ m}, M_w = 1150 \text{ kg}, \eta_w = 0.97$$

$$L_{c,v} = 5 \text{ m}$$

$$k_{\min} = 3, k_{\max} = 34$$

- pogon kretanja kрана

$$v_{\max} = v_4 = 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_3 = 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_2 = 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_{\min} = v_1 = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Moment inercije kabl-bubnja, određen korišćenjem izraza 4.2, iznosi $J_w = 3603.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Ukupan stepen korisnog dejstva od asinhronog motora do kabl-bubnja, određen korišćenjem izraza 4.18, ima vrednost $\eta_t = 0.5841$.

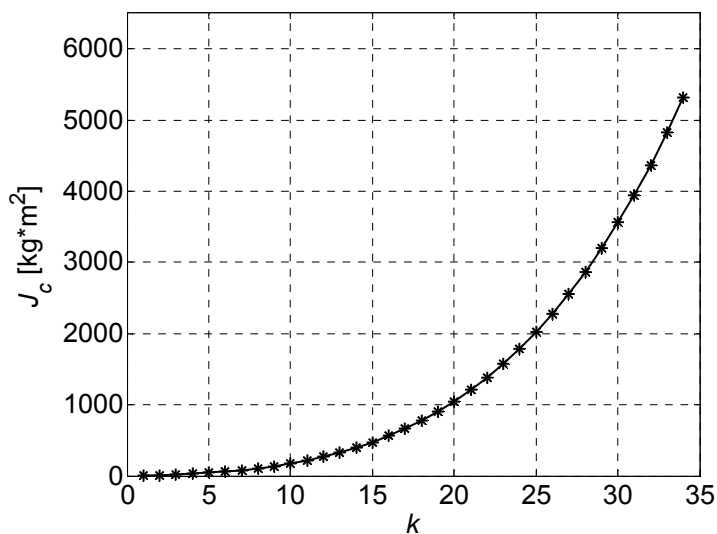
Zadata vrednost sile zatezanja kabla za željenu dužinu kabla u vazduhu $L_{c,v} = 5 \text{ m}$, određena korišćenjem izraza 4.11, iznosiće $F_{c,z} = 299.2050 \text{ N}$, što je manje od maksimalno dopuštene statičke sile zatezanja kabla $F_{c,\max}$, $F_{c,z} < F_{c,\max}$.

Na osnovu izložene teorijske analize sračunate su vrednosti karakterističnih veličina za kabl-bubanj, a za broj namota kabla na kabl-bubnju $k = 1 \div 34$. Rezultati su dati u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Vrednosti karakterističnih veličina za kabl-bubanj, za $k = 1 \div 34$

k	D [m]	L_c [m]	M_c [kg]	J_c [kg · m ²]	J_t [kg · m ²]
1	1.0026	3.1498	19.2135	4.3191	3607.7866
2	1.1146	6.6514	40.5734	10.3234	3613.7909
3	1.2266	10.5049	64.0796	18.4046	3621.8721
4	1.3386	14.7102	89.7322	28.9949	3632.4624
5	1.4506	19.2674	117.5311	42.5669	3646.0344
6	1.5626	24.1764	147.4763	59.6336	3663.1011
7	1.6746	29.4374	179.5678	80.7484	3684.2159
8	1.7866	35.0501	213.8057	106.5049	3709.9724
9	1.8986	41.0147	250.1900	137.5373	3741.0048
10	2.0106	47.3312	288.7205	174.5200	3777.9875
11	2.1226	53.9996	329.3974	218.1681	3821.6356
12	2.2346	61.0198	372.2207	269.2368	3872.7043
13	2.3466	68.3918	417.1902	328.5217	3931.9892
14	2.4586	76.1158	464.3062	396.8589	4000.3264
15	2.5706	84.1915	513.5684	475.1248	4078.5923
16	2.6826	92.6192	564.9770	564.2362	4167.7037
17	2.7946	101.3987	618.5319	665.1505	4268.6180
18	2.9066	110.5300	674.2332	778.8650	4382.3325
19	3.0186	120.0132	732.0807	906.4179	4509.8854
20	3.1306	129.8483	792.0747	1048.8875	4652.3550
21	3.2426	140.0352	854.2149	1207.3926	4810.8601
22	3.3546	150.5740	918.5015	1383.0922	4986.5597
23	3.4666	161.4647	984.9345	1577.1859	5180.6534
24	3.5786	172.7072	1053.5137	1790.9136	5394.3811
25	3.6906	184.3015	1124.2394	2025.5556	5629.0231
26	3.8026	196.2478	1197.1113	2282.4326	5885.9001
27	3.9146	208.5458	1272.1296	2562.9056	6166.3731
28	4.0266	221.1958	1349.2942	2868.3761	6471.8436
29	4.1386	234.1976	1428.6051	3200.2859	6803.7534
30	4.2506	247.5512	1510.0624	3560.1173	7163.5848
31	4.3626	261.2567	1593.6661	3949.3928	7552.8603
32	4.4746	275.3141	1679.4160	4369.6754	7973.1429
33	4.5866	289.7233	1767.3123	4822.5685	8426.0360
34	4.6986	304.4844	1857.3549	5309.7158	8913.1833

Ilustracije radi, na slici 4.9 prikazana je jedna zavisnost iz tabele 4.1, i to zavisnost momenta inercije kabla na kabl-bubnju od broja namota kabla na kabl-bubnju, $J_c = f(k)$, dobijena na osnovu izraza 4.4 (ili iz tabele 4.1), a za $k = 1 \div 34$.



Slika 4.9. Zavisnost $J_c = f(k)$, za $k = 1 \div 34$

Imajući u vidu napred navedeno, kao i zavisnost datu na slici 4.9, može se zaključiti da se moment inercije kabla na kabl-bubnju, J_c , menja u toku vremena, a kao posledica kretanja kрана.

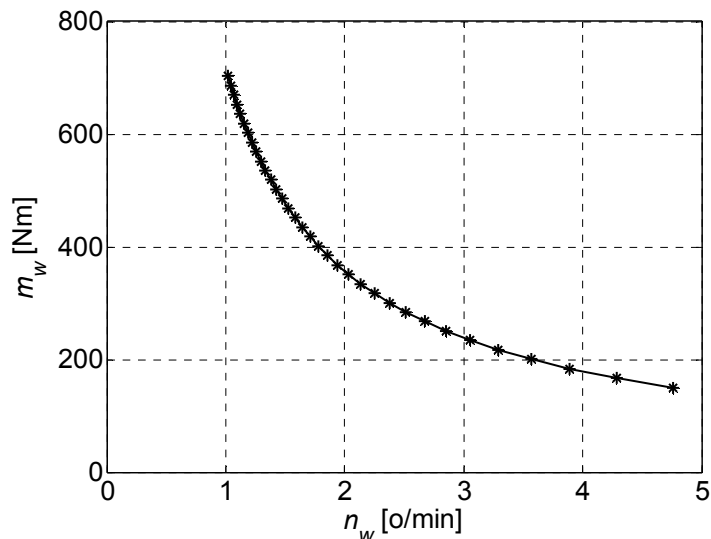
Takođe, analizom vrednosti iz tabele 4.1, može se zaključiti da se ukupan moment inercije kabl-bubnja, J_t , sporo menja pri kretanju kрана, a samim tim i u vremenu, što opravdava tvrđenje navedeno u izrazu 4.28.

Vrednosti momenta kabl-bubnja, a za broj namota kabla na kabl-bubnju $k = 1 \div 34$, date su u tabeli 4.2. Takođe, u tabeli 4.2 date su i vrednosti brzine obrtanja kabl-bubnja, a za broj namota kabla na kabl-bubnju $k = 1 \div 34$, i pri konstantnim brzinama kretanja kрана $0.25 \frac{m}{s}$, $0.18 \frac{m}{s}$, $0.12 \frac{m}{s}$ i $0.06 \frac{m}{s}$.

Tabela 4.2. Vrednosti momenta i brzine obrtanja kabl-bubnja, za $k = 1 \div 34$

		pri v [m/s]			
		0.25	0.18	0.12	0.06
k	m_w [Nm]	n_w [°/min]			
1	149.9915	4.7623	3.4288	2.2859	1.1429
2	166.7469	4.2837	3.0843	2.0562	1.0281
3	183.5024	3.8926	2.8027	1.8684	0.9342
4	200.2579	3.5669	2.5682	1.7121	0.8561
5	217.0134	3.2915	2.3699	1.5799	0.7900
6	233.7689	3.0556	2.2000	1.4667	0.7333
7	250.5243	2.8512	2.0529	1.3686	0.6843
8	267.2798	2.6725	1.9242	1.2828	0.6414
9	284.0353	2.5148	1.8107	1.2071	0.6036
10	300.7908	2.3747	1.7098	1.1399	0.5699
11	317.5463	2.2494	1.6196	1.0797	0.5399
12	334.3017	2.1367	1.5384	1.0256	0.5128
13	351.0572	2.0347	1.4650	0.9767	0.4883
14	367.8127	1.9420	1.3983	0.9322	0.4661
15	384.5682	1.8574	1.3373	0.8916	0.4458
16	401.3237	1.7799	1.2815	0.8543	0.4272
17	418.0791	1.7085	1.2301	0.8201	0.4100
18	434.8346	1.6427	1.1827	0.7885	0.3942
19	451.5901	1.5817	1.1389	0.7592	0.3796
20	468.3456	1.5252	1.0981	0.7321	0.3660
21	485.1011	1.4725	1.0602	0.7068	0.3534
22	501.8565	1.4233	1.0248	0.6832	0.3416
23	518.6120	1.3773	0.9917	0.6611	0.3306
24	535.3675	1.3342	0.9606	0.6404	0.3202
25	552.1230	1.2937	0.9315	0.6210	0.3105
26	568.8785	1.2556	0.9041	0.6027	0.3014
27	585.6339	1.2197	0.8782	0.5855	0.2927
28	602.3894	1.1858	0.8538	0.5692	0.2846
29	619.1449	1.1537	0.8307	0.5538	0.2769
30	635.9004	1.1233	0.8088	0.5392	0.2696
31	652.6559	1.0945	0.7880	0.5253	0.2627
32	669.4113	1.0671	0.7683	0.5122	0.2561
33	686.1668	1.0410	0.7495	0.4997	0.2498
34	702.9223	1.0162	0.7317	0.4878	0.2439

Primera radi, zavisnost momenta kabl-bubnja od brzine obrtanja kabl-bubnja, $m_w = f(n_w)$, dobijena na osnovu izraza 4.16 (ili iz tabele 4.2), a za $k = 1 \div 34$, prikazana je na slici 4.10, i to pri konstantnoj sili zatezanja kabla od 299.2050 N i pri konstantnoj brzini kretanja kрана $0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Slika 4.10. Zavisnost $m_w = f(n_w)$, za $k = 1 \div 34$, pri $v = 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Imajući u vidu napred navedeno, kao i zavisnost datu na slici 4.10, može se zaključiti da je, pri konstantnoj sili zatezanja kabla, $F_{c,z}$, i pri konstantnoj brzini kretanja kрана, v , moment kabl-bubnja obrnuto proporcionalan brzini obrtanja kabl-bubnja. Naime, da bi se obezbedila konstantna sila zatezanja kabla pri, na primer, većem broju namota kabla na kabl-bubnju, odnosno pri većem spoljašnjem prečniku namotanog kabla, potreban je i veći moment na vratilu kabl-bubnja, a u skladu sa izrazom 4.14. Takođe, u opisanom slučaju, pri konstantnoj brzini kretanja kрана ima se manja brzina obrtanja kabl-bubnja, a u skladu sa izrazom 4.15. Zavisnost momenta kabl-bubnja od brzine obrtanja kabl-bubnja data je izrazom 4.16.

Vrednosti snage zatezanja kabla, dobijene na osnovu izraza 4.12 ili 4.13, a pri konstantnoj sili zatezanja kabla od 299.2050 N i pri konstantnim brzinama kretanja kрана $0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i $0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, date su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Vrednosti snage zatezanja kabla

	$v \text{ [m/s]}$			
	0.25	0.18	0.12	0.06
$P_w \text{ [W]}$	74.8013	53.8569	35.9046	17.9523

Derik kran se kreće kranskom stazom i to levo i desno u odnosu na kabinu dizaličara (slika 4.6). Brzina kretanja kрана, v , je konstantna i može imati jednu od četiri unapred zadate vrednosti: $0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i $0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Minimalan i maksimalan broj namota kabla na kabl-bubnju je $k_{\min} = 3$ i $k_{\max} = 34$, respektivno.

Maksimalne i minimalne vrednosti brzine i momenta na vratilu kabl-bubnja mogu se očitati iz tabele 4.2, a maksimalna i minimalna vrednost snage zatezanja kabla iz tabele 4.3. Imaju se sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 n_{w, \max} &= 3.8926 \text{ o/min}; & m_{w, \max} &= 702.9223 \text{ Nm}; & P_{w, \max} &= 74.8013 \text{ W}; \\
 n_{w, \min} &= 0.2439 \text{ o/min}; & m_{w, \min} &= 183.5024 \text{ Nm}; & P_{w, \min} &= 17.9523 \text{ W}.
 \end{aligned}$$

4.2. Izbor motora za pogon kabl-bubnja

Izbor trofaznog asinhronog motora, kojim se kabl-bubanj pokreće, vrši se na osnovu maksimalno potrebnih vrednosti momenta motora i brzine motora.

Maksimalno potrebni moment motora, $m_{m, \max}$, je maksimalna vrednost momenta motora kojim treba da se obezbedi zadata vrednost sile zatezanja kabla u svim režimima rada pri namotavanju i odmotavanju kabla, a uz uvažavanje gubitaka u pogonu i dinamike pogona.

Maksimalno potrebni moment motora može da se odredi na osnovu izraza za moment motora iz 4.36, pri čemu, da bi ovaj izraz bio primenjiv u svim režimima rada pri namotavanju i odmotavanju kabla, član $\frac{1}{\eta_t}$ treba da se zameni članom $\frac{1}{\eta_t^{rw}}$, a u skladu sa prethodnom analizom:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \quad (4.58)$$

Maksimalno potrebni moment motora očekuje se pri položaju kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze, pri maksimalnom broju namota kabla na kabl-bubnju, k_{\max} . Kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004 važi $k_{\max} = 34$. Analizom rezultata za $k \approx 34$, datih u Prilogu 3, može se zaključiti da se maksimalno potrebni moment motora očekuje pri namotavanju kabla u režimu zaletanja kрана, jer u skladu sa prethodnom analizom tada važi $rw = 1$ (pri odmotavanju kabla u režimu kočenja kрана gubitke u pogonu “pokriva” kabl-bubanj, pa je $rw = -1$). Za navedeni slučaj, a na osnovu rezultata datih u Prilogu 3, u cilju jednostavnijeg izbora asinhronog motora, može se usvojiti da važi:

$$D \cdot \frac{dv}{dt} \gg v \cdot \frac{dD}{dt} \quad (4.59)$$

Sada, izraz za moment motora dat jednačinom 4.58, pri zanemarenju iz 4.59, može da se napiše na sledeći način:

$$m_m = I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt} + \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} \quad (4.60)$$

Analizom izraza 4.60 može se zaključiti da moment motora, između ostalog, zavisi i od dinamike motora. Međutim, s obzirom da motor nije izabran, vrednost momenta inercije motora, J_m , nije poznata. U cilju procene vrednosti za maksimalno potrebni moment motora može da se usvoji neka tipična vrednost za moment inercije motora, npr. motor od 1.5 kW ($1435 \frac{\text{0}}{\text{min}}$) ima moment inercije $0.0036 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004, za usvojenu vrednost momenta inercije motora, pri položaju kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze, gde važi $k_{\max} = 34$, pri namotavanju kabla u režimu zaletanja kрана sa konstantnim ubrzanjem $a = \frac{dv}{dt} = \frac{0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}}$, imaju se sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned} I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt} &= 0.0253 \text{ Nm} \\ \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} &= 4.8015 \text{ Nm} \\ m_m &= 4.8268 \text{ Nm} . \end{aligned} \quad (4.61)$$

Analizom rezultata iz 4.61, a u cilju izbora asinhronog motora, izraz za moment motora dat jednačinom 4.60 može biti uprošćen zanemarenjem dinamike motora i pužnog reduktora:

$$m_m = \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} . \quad (4.62)$$

Konačno, u cilju izbora asinhronog motora, može biti korišćen sledeći izraz za moment motora:

$$m_m = \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{dv}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}} . \quad (4.63)$$

U skladu sa napred navedenim, maksimalno potrebni moment motora ima vrednost:

$$m_{m, \max} = \left\{ J_t \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{dv}{dt} + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} \right\} \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t} , \text{ pri } k_{\max} . \quad (4.64)$$

Napomena: u cilju dokazivanja opravdanosti uvedenih zanemarenja, u Prilogu 4 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina, dobijene korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004, a za usvojeni moment inercije motora $0.0036 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Maksimalno potrebna brzina motora, $n_{m, \max}$, je maksimalna vrednost brzine motora, koja mora da odgovara brzini obrtanja kabl-bubnja, n_w , odnosno linijskoj brzini namotavanja/odmotavanja kabla koja je jednaka brzini kretanja kрана, v .

Maksimalno potrebna brzina motora može da se odredi korišćenjem izraza za brzinu motora iz 4.52, a očekuje se u krajnje levom i krajnje desnom položaju kрана u odnosu na priključno mesto, odnosno na krajevima kranske staze, pri minimalnom broju namota kabla na kabl-bubnju, k_{\min} , i to pri maksimalnoj brzini kretanja kрана, v_{\max} .

U skladu sa napred navedenim, maksimalno potrebna brzina motora ima vrednost:

$$n_{m, \max} = v_{\max} \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot I_t, \text{ pri } k_{\min} . \quad (4.65)$$

Imajući u vidu maksimalno potrebni moment motora i maksimalno potrebnu brzinu motora, minimalna snaga motora, $P_{m, \min}$, može da se odredi korišćenjem izraza za snagu motora iz 4.53:

$$P_{m, \min} = m_{m, \max} \cdot n_{m, \max} \cdot \frac{2\pi}{60} . \quad (4.66)$$

Minimalno potrebna brzina motora, $n_{m, \min}$, u kvazistacionarnom stanju, pri konstantnoj brzini kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja/odmotavanja kabla, može da se odredi korišćenjem izraza za brzinu motora iz 4.52, a očekuje se pri položaju kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze, pri maksimalnom broju namota kabla na kabl-bubnju, k_{\max} , i to pri minimalnoj brzini kretanja kрана, v_{\min} .

U skladu sa napred navedenim, minimalno potrebna brzina motora ima vrednost:

$$n_{m, \min} = v_{\min} \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot I_t, \text{ pri } k_{\max} . \quad (4.67)$$

Minimalno potrebna brzina motora, $n_{m, \min}$, je najmanja vrednost brzine motora u kvazistacionarnom stanju pri kojoj motor mora da razvije maksimalno potrebni moment, $m_{m, \max}$.

4.2.1. Primer proračuna za izbor motora kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004

U cilju izbora motora za pogon kabl-bubnja na Derik kranu DK004, a primenom izraza 4.64 do 4.67, dobijene su sledeće vrednosti:

- maksimalno potrebni moment motora: $m_{m, \max} = 4.8015 \text{ Nm}$,
- maksimalno potrebna brzina motora: $n_{m, \max} = 1238.9 \frac{\circ}{\text{min}}$,
- minimalna snaga motora: $P_{m, \min} = 622.9296 \text{ W}$,
- minimalno potrebna brzina motora: $n_{m, \min} = 77.6203 \frac{\circ}{\text{min}}$.

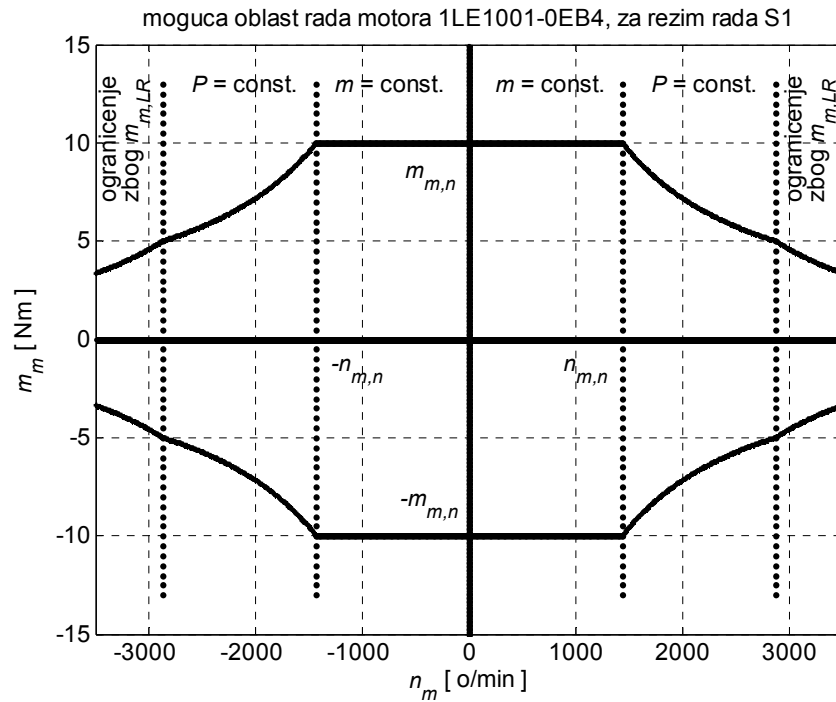
Imajući u vidu sračunate vrednosti, za pokretanje pogona kabl-bubnja, uz minimalni koeficijent sigurnosti 2, može se izabrati trofazni asinhroni motor sa kavezim rotorom 1LE1001-0EB4, proizvođača Siemens. Bitni kataloški podaci za ovaj motor dati su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Bitni kataloški podaci za motor 1LE1001-0EB4, proizvođača Siemens

motor: 1LE1001-0EB4 (Siemens)		
$U_{m,n}$	400 Y / 230 Δ	V
$f_{m,n}$	50	Hz
$P_{m,n}$	1.5	kW
$n_{m,n}$	1435	°/min
$m_{m,n}$	10	Nm
$\eta_{m,n}$	0.828	
$\cos\varphi_{m,n}$	0.79	
$I_{m,n}$	3.3 Y / 5.7 Δ	A
$m_{m,LR}/m_{m,n}$	2.6	
$I_{m,LR}/I_{m,n}$	6.4	
$m_{m,B}/m_{m,n}$	3.4	
J_m	0.0036	kg·m ²
$n_{m,\max}$	4200	°/min

Na slici 4.11 prikazana je moguća oblast rada motora 1LE1001-0EB4, proizvođača Siemens, i to za režim rada S1, odnosno “trajan pogon”.

Napomena: moguća oblast rada, zbog preglednosti, prikazana je do $3500 \text{ }^{\circ}/\text{min}$ (maksimalna brzina obrtanja motora 1LE1001-0EB4 iznosi $4200 \text{ }^{\circ}/\text{min}$).



Slika 4.11. Moguća oblast rada motora 1LE1001-0EB4, za režim rada S1 (“trajan pogon”)

Vrednosti potrebnog momenta motora, u svim režimima rada kрана (zaletanje, konstantna brzina kretanja, kočenje) pri namotavanju i odmotavanju kabla, dobijene korišćenjem izraza 4.63, i to pri konstantnoj sili zatezanja kabla od 299.2050 N, a za broj namota kabla na kabl-bubnju $k = 1 \div 34$, date su u tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Vrednosti potrebnog momenta motora, za $k = 1 \div 34$

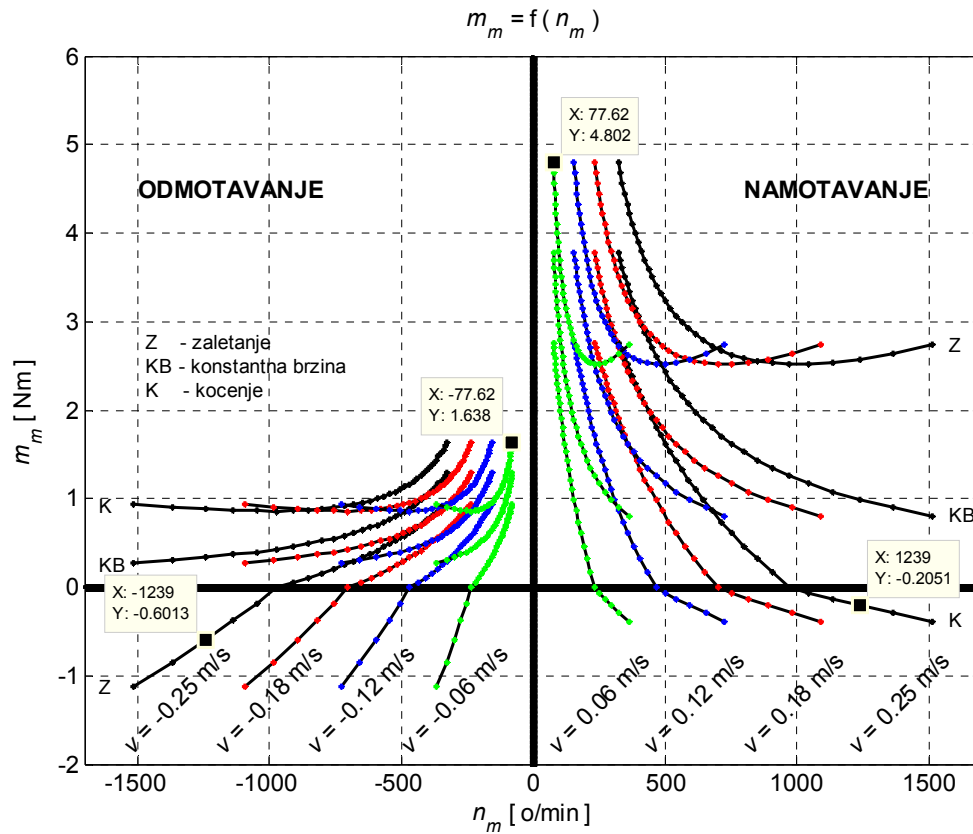
k	m_m [Nm]					
	namotavanje			odmotavanje		
	zaletanje	konstantna brzina	kočenje	zaletanje	konstantna brzina	kočenje
1	2.7425	0.8068	-0.3851	-1.1288	0.2753	0.9357
2	2.6410	0.8970	-0.2890	-0.8471	0.3060	0.9011
3	2.5754	0.9871	-0.2051	-0.6013	0.3368	0.8787
4	2.5369	1.0772	-0.1305	-0.3825	0.3675	0.8656
5	2.5194	1.1673	-0.0630	-0.1847	0.3983	0.8596
6	2.5185	1.2575	-0.0012	-0.0035	0.4290	0.8593
7	2.5311	1.3476	0.1642	0.0560	0.4598	0.8636
8	2.5547	1.4377	0.3207	0.1094	0.4905	0.8716
9	2.5878	1.5279	0.4680	0.1597	0.5213	0.8829
10	2.6288	1.6180	0.6072	0.2072	0.5520	0.8969
11	2.6766	1.7081	0.7396	0.2524	0.5828	0.9132
12	2.7305	1.7983	0.8660	0.2955	0.6135	0.9316
13	2.7897	1.8884	0.9871	0.3368	0.6443	0.9518
14	2.8537	1.9785	1.1033	0.3764	0.6750	0.9737
15	2.9221	2.0687	1.2152	0.4146	0.7058	0.9970
16	2.9945	2.1588	1.3231	0.4514	0.7365	1.0217
17	3.0705	2.2489	1.4273	0.4870	0.7673	1.0476
18	3.1501	2.3390	1.5280	0.5213	0.7980	1.0748
19	3.2328	2.4292	1.6255	0.5546	0.8288	1.1030
20	3.3187	2.5193	1.7199	0.5868	0.8595	1.1323
21	3.4075	2.6094	1.8114	0.6180	0.8903	1.1626
22	3.4992	2.6996	1.9000	0.6482	0.9211	1.1939
23	3.5936	2.7897	1.9858	0.6775	0.9518	1.2261
24	3.6907	2.8798	2.0690	0.7059	0.9826	1.2592
25	3.7904	2.9700	2.1495	0.7334	1.0133	1.2932
26	3.8927	3.0601	2.2275	0.7600	1.0441	1.3281
27	3.9975	3.1502	2.3029	0.7857	1.0748	1.3639
28	4.1049	3.2403	2.3758	0.8106	1.1056	1.4005
29	4.2148	3.3305	2.4462	0.8346	1.1363	1.4380
30	4.3272	3.4206	2.5140	0.8578	1.1671	1.4764
31	4.4420	3.5107	2.5795	0.8801	1.1978	1.5155
32	4.5594	3.6009	2.6424	0.9015	1.2286	1.5556
33	4.6792	3.6910	2.7028	0.9222	1.2593	1.5965
34	4.8015	3.7811	2.7607	0.9419	1.2901	1.6382

Vrednosti potrebne brzine motora, pri namotavanju i odmotavanju kabla i pri konstantnim brzinama kretanja kрана $0.25 \frac{m}{s}$, $0.18 \frac{m}{s}$, $0.12 \frac{m}{s}$ i $0.06 \frac{m}{s}$, dobijene korišćenjem izraza 4.52, a za broj namota kabla na kabl-bubnju $k = 1 \div 34$, date su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Vrednosti potrebne brzine motora, za $k = 1 \div 34$

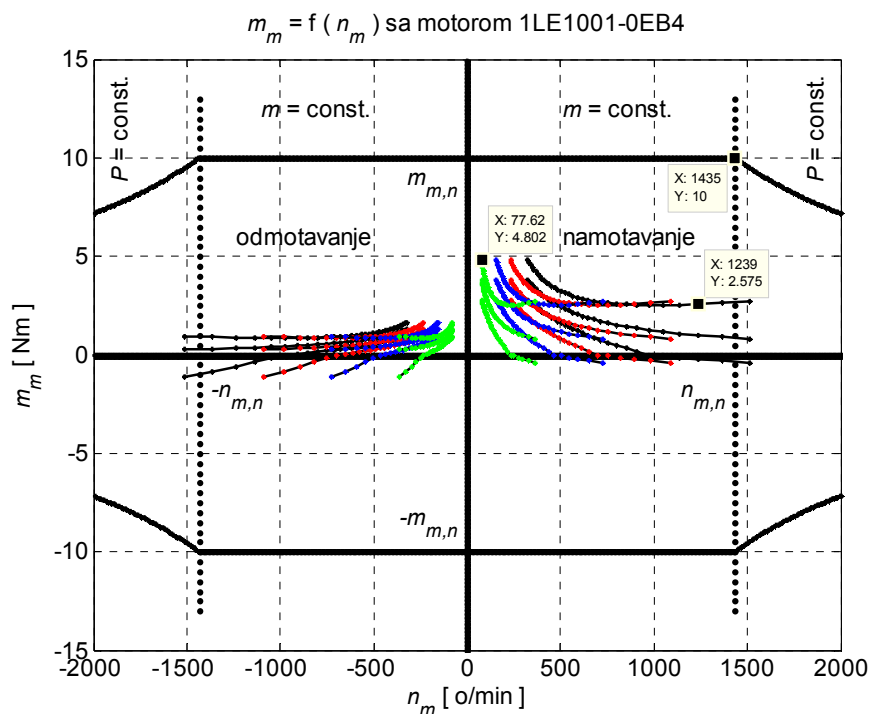
	namotavanje pri v [$\frac{m}{s}$]				odmotavanje pri v [$\frac{m}{s}$]			
	0.25	0.18	0.12	0.06	-0.25	-0.18	-0.12	-0.06
k	n_m [$^{\circ}/\text{min}$]							
1	1515.6707	1091.2829	727.5219	363.7610	-1515.6707	-1091.2829	-727.5219	-363.7610
2	1363.3693	981.6259	654.4173	327.2086	-1363.3693	-981.6259	-654.4173	-327.2086
3	1238.8810	891.9943	594.6629	297.3314	-1238.8810	-891.9943	-594.6629	-297.3314
4	1135.2244	817.3616	544.9077	272.4539	-1135.2244	-817.3616	-544.9077	-272.4539
5	1047.5744	754.2536	502.8357	251.4179	-1047.5744	-754.2536	-502.8357	-251.4179
6	972.4891	700.1921	466.7947	233.3974	-972.4891	-700.1921	-466.7947	-233.3974
7	907.4474	653.3621	435.5747	217.7874	-907.4474	-653.3621	-435.5747	-217.7874
8	850.5605	612.4036	408.2690	204.1345	-850.5605	-612.4036	-408.2690	-204.1345
9	800.3852	576.2774	384.1849	192.0925	-800.3852	-576.2774	-384.1849	-192.0925
10	755.8000	544.1760	362.7840	181.3920	-755.8000	-544.1760	-362.7840	-181.3920
11	715.9198	515.4623	343.6415	171.8208	-715.9198	-515.4623	-343.6415	-171.8208
12	680.0373	489.6269	326.4179	163.2090	-680.0373	-489.6269	-326.4179	-163.2090
13	647.5801	466.2577	310.8384	155.4192	-647.5801	-466.2577	-310.8384	-155.4192
14	618.0800	445.0176	296.6784	148.3392	-618.0800	-445.0176	-296.6784	-148.3392
15	591.1505	425.6283	283.7522	141.8761	-591.1505	-425.6283	-283.7522	-141.8761
16	566.4696	407.8581	271.9054	135.9527	-566.4696	-407.8581	-271.9054	-135.9527
17	543.7670	391.5123	261.0082	130.5041	-543.7670	-391.5123	-261.0082	-130.5041
18	522.8141	376.4261	250.9508	125.4754	-522.8141	-376.4261	-250.9508	-125.4754
19	503.4160	362.4595	241.6397	120.8198	-503.4160	-362.4595	-241.6397	-120.8198
20	485.4058	349.4922	232.9948	116.4974	-485.4058	-349.4922	-232.9948	-116.4974
21	468.6398	337.4207	224.9471	112.4736	-468.6398	-337.4207	-224.9471	-112.4736
22	452.9933	326.1552	217.4368	108.7184	-452.9933	-326.1552	-217.4368	-108.7184
23	438.3579	315.6177	210.4118	105.2059	-438.3579	-315.6177	-210.4118	-105.2059
24	424.6385	305.7397	203.8265	101.9132	-424.6385	-305.7397	-203.8265	-101.9132
25	411.7519	296.4613	197.6409	98.8204	-411.7519	-296.4613	-197.6409	-98.8204
26	399.6243	287.7295	191.8197	95.9098	-399.6243	-287.7295	-191.8197	-95.9098
27	388.1907	279.4973	186.3315	93.1658	-388.1907	-279.4973	-186.3315	-93.1658
28	377.3932	271.7231	181.1487	90.5744	-377.3932	-271.7231	-181.1487	-90.5744
29	367.1801	264.3696	176.2464	88.1232	-367.1801	-264.3696	-176.2464	-88.1232
30	357.5052	257.4037	171.6025	85.8012	-357.5052	-257.4037	-171.6025	-85.8012
31	348.3270	250.7954	167.1970	83.5985	-348.3270	-250.7954	-167.1970	-83.5985
32	339.6083	244.5180	163.0120	81.5060	-339.6083	-244.5180	-163.0120	-81.5060
33	331.3154	238.5471	159.0314	79.5157	-331.3154	-238.5471	-159.0314	-79.5157
34	323.4179	232.8609	155.2406	77.6203	-323.4179	-232.8609	-155.2406	-77.6203

Zavisnost potrebnog momenta od brzine motora, $m_m = f(n_m)$, dobijena na osnovu izraza 4.52 i 4.63 (ili iz tabela 4.5 i 4.6), a za $k = 1 \div 34$, prikazana je na slici 4.12, i to za sve režime rada kрана (zaletanje, konstantna brzina kretanja, kočenje) pri namotavanju i odmotavanju kabla, a pri konstantnoj sili zatezanja kabla od 299.2050 N i pri konstantnim brzinama kretanja kрана $0.25 \frac{m}{s}$, $0.18 \frac{m}{s}$, $0.12 \frac{m}{s}$ i $0.06 \frac{m}{s}$.



Slika 4.12. Zavisnost $m_m = f(n_m)$, za $k = 1 \div 34$

Zavisnost potrebnog momenta od brzine motora, $m_m = f(n_m)$, sa slike 4.12, prikazana sa mogućom oblašću rada motora 1LE1001-0EB4, a za režim rada S1, sa slike 4.11, data je na slici 4.13.



Slika 4.13. Zavisnost $m_m = f(n_m)$ sa mogućom oblašću rada motora 1LE1001-0EB4

Analizom slike 4.13 može se doći do zaključka da se najmanja preopteretljivost motora, $v_{m,\min}$, za režim rada S1, ima u oblasti konstantnog momenta, a za položaj kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze gde je $k_{\max} = 34$, i to pri namotavanju kabla u režimu zaletanja kрана. Najmanja preopteretljivost motora iznosi:

$$v_{m,\min} = \frac{10 \text{ Nm}}{4.8015 \text{ Nm}} = 2.0827.$$

S obzirom da važi $v_{m,\min} \geq 2$, željeni minimalni koeficijent sigurnosti je obezbeđen.

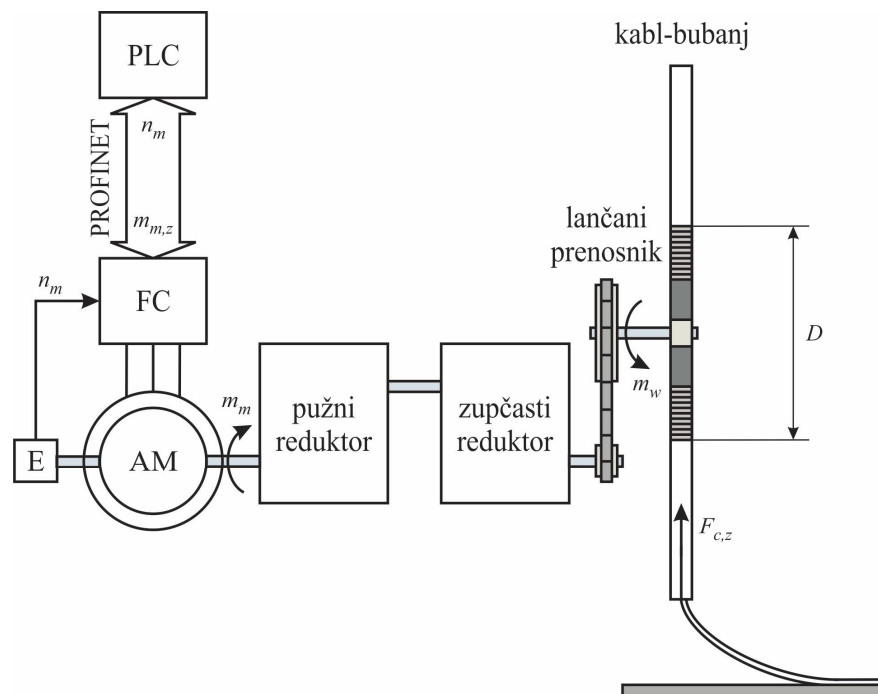
Imajući u vidu napred navedeno, nameće se zaključak da trofazni asinhroni motor sa kaveznim rotorom 1LE1001-0EB4, proizvođača Siemens, može biti iskorišćen za pokretanje pogona kabl-bubnja, i to uz koeficijent sigurnosti 2.0827.

4.3. Algoritam upravljanja pogonom kabl-bubnja

Za pogone sa namotačima u literaturi se može naći podela na četiri tipa algoritama upravljanja. Upravljanje pogonom namotača može biti realizovano po momentu ili po brzini. Upravljanje po momentu može biti sa ili bez davača sile zatezanja materijala. Upravljanje po brzini može biti sa denderom ili sa davačem brzine kretanja materijala. Svi algoritmi upravljanja podrazumevaju enkoder na motoru za pogon namotača.

Imajući u vidu da pri namotavanju/odmotavanju kabla precizna regulacija sile zatezanja kabla nije neophodna, kao i ekonomski aspekt koji iz toga proističe, ovde će detaljno biti analizirano upravljanje pogonom kabl-bubnja po momentu bez davača sile zatezanja kabla (indirektna regulacija sile zatezanja).

Da bi se pri namotavanju/odmotavanju kabla, u svim režimima rada pogona kabl-bubnja, imala konstantna sila zatezanja kabla, $F_{c,z}$, moment kabl-bubnja, m_w , mora da ima vrednost u skladu sa izrazom 4.14. Samim tim, imajući u vidu prethodnu analizu i uvedena zanemarenja, moment motora, m_m , treba da ima vrednost u skladu sa izrazom 4.58. Navedeni moment motora treba da obezbedi frekvencijski pretvarač (FC) iz kog se motor napaja (slika 4.14).



Slika 4.14. Principijelna blok šema pogona kabl-bubnja – upravljanje

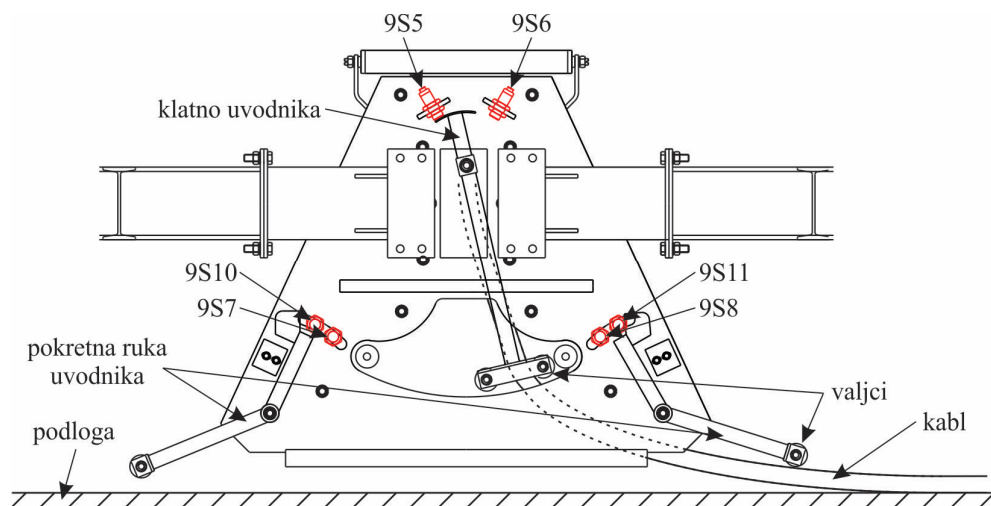
Frekvencijski pretvarač radi u režimu po momentu, a sa zatvorenim povratnom vezom po brzini motora koju obezbeđuje enkoder (E). Enkoder je montiran na motor za pogon kabl-bubnja.

Radom frekvencijskog pretvarača upravlja PLC sistem. Komunikacija između PLC-a i pretvarača realizovana je nekom od industrijskih komunikacionih mreža, npr. PROFINET mrežom.

Moment motora, koji treba da obezbedi frekvencijski pretvarač, potrebno je u svakom procesorskom ciklusu proračunati u PLC-u, a u skladu sa izrazom 4.58, i proslediti ga pretvaraču kao zadati moment motora, $m_{m,z}$, odnosno kao referencu. S obzirom da izraz 4.58, između ostalog, zavisi i od vrednosti spoljašnjeg prečnika namotanog kabla, D , proračun zadanog momenta motora u svakom procesorskom ciklusu zahteva dosta procesorskog vremena. To za posledicu ima znatno produženje ciklusa PLC-a, što, imajući u vidu da PLC upravlja radom celog kрана, nije poželjno. Nameće se zaključak da je za pogon kabl-bubnja neophodna ugradnja posebnog PLC-a, adekvatnih performansi.

Analizom uslova pod kojima je izveden izraz 4.58 može se zaključiti sledeće:

- Nije uvažen uticaj brzine na gubitke u pogonu. Gubici u pogonu, za sve elemente pogona, aproksimirani su kroz stepen korisnog dejstva, koji je u praksi lako dostupan podatak. Uticaj brzine na gubitke, zbog nedostatka adekvatnih podataka, teško je uvažiti na pravi način.
- Zanemaren je uticaj dinamike zupčastog reduktora i lančanog prenosnika na dinamiku pogona.
- Zanemaren je uticaj promene ukupnog momenta inercije kabl-bubnja na dinamiku pogona.
- Zanemareni su gubici u uvodniku kabl-bubnja. Naime, zadata vrednost sile zatezanja kabla procenjena je na osnovu željene dužine kabla u vazduhu, a pod pretpostavkom da pri kretanju kabla između kabl-bubnja i podloge nema gubitaka. U praksi, između kabl-bubnja i podloge nalazi se uvodnik kabl-bubnja, koji je prikazan na slici 4.15. Pri kretanju kabla kroz uvodnik kabl-bubnja, a preko sistema valjaka pokretne ruke i klatna uvodnika, javljaju se gubici usled trenja i savijanja kabla. Ovi gubici zavise od brzine i od sile zatezanja kabla, a u praksi, teško ih je uvažiti na adekvatan način.



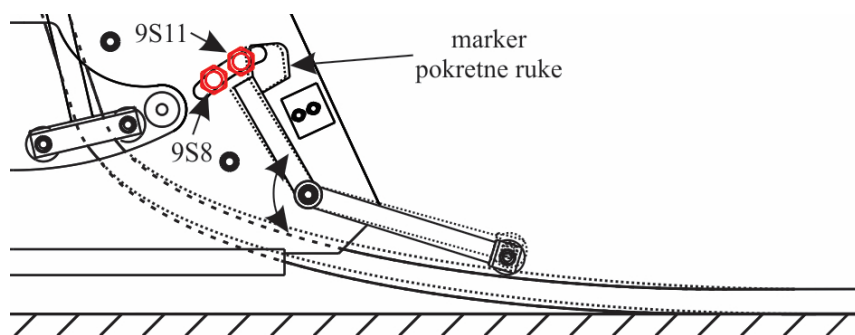
Slika 4.15. Uvodnik kabl-bubnja – kran levo u odnosu na priključno mesto

Imajući u vidu napred navedeno, nameće se zaključak da primena izraza 4.58 za proračun zadatog momenta motora ne može da obezbedi konstantnu vrednost sile zatezanja kabla. Da bi se primenom ovog izraza dobila konstantna vrednost sile zatezanja, neophodno je izvršiti kompenzaciju poremećaja.

U cilju kompenzacije poremećaja, na uvodnik kabl-bubnja ugrađene su dve pokretne ruke, a za položaje kрана desno i levo u odnosu na priključno mesto (slika 4.15). Analizom rada uvodnika kabl-bubnja može se zaključiti da položaj pokretne ruke uvodnika zavisi od sile zatezanja kabla. Takođe, pri konstantnoj vrednosti sile zatezanja, položaj pokretne ruke se ne menja. Nameće se zaključak da regulacijom položaja pokretne ruke može da se reguliše i sila zatezanja kabla. Precizna regulacija položaja pokretne ruke moguća je primenom odgovarajućeg analognog davača. Međutim, s obzirom da precizna regulacija sile zatezanja kabla nije neophodna, za regulaciju položaja pokretne ruke iskorišćen je digitalni davač. Ustvari, s obzirom da uvodnik kabl-bubnja ima dve pokretne ruke, primenjen je po jedan induktivni davač za svaku, a za položaje kрана desno i levo u odnosu na priključno mesto, 9S10 i 9S11 respektivno.

Položaj induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja, 9S10 i 9S11, bira se u skladu sa željenim položajem pokretne ruke, odnosno željenom silom zatezanja kabla. Ideja je da se zadati moment motora računa korišćenjem izraza 4.58, a proračunata vrednost koriguje na osnovu položaja pokretne ruke. Ukoliko induktivni davač nije aktivan, kabl nije dovoljno zategnut i proračunata vrednost zadatog momenta motora treba da se poveća. Ako je induktivni davač aktivan, kabl je pretegnut i proračunata vrednost zadatog momenta motora treba da se smanji.

Na slici 4.16 ilustrovana je opisana procedura kompenzacije poremećaja, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto. Neka je u početnom trenutku marker pokretne ruke van induktivnog davača 9S11, što znači da induktivni davač nije aktivan. Zadati moment motora treba povećati, usled čega dolazi do izvesnog povećanja sile zatezanja kabla i blage rotacije pokretne ruke u smeru suprotnom od smera kazaljke na satu. Marker pokretne ruke dolazi na induktivni davač 9S11, što ga aktivira. Zadati moment motora treba smanjiti, usled čega dolazi do izvesnog smanjenja sile zatezanja kabla i blage rotacije pokretne ruke u smeru kazaljke na satu. Marker pokretne ruke dolazi van induktivnog davača 9S11, što ga deaktivira. Navedena procedura se ponavlja.



Slika 4.16. Pokretna ruka uvodnika kabl-bubnja – kompenzacija poremećaja

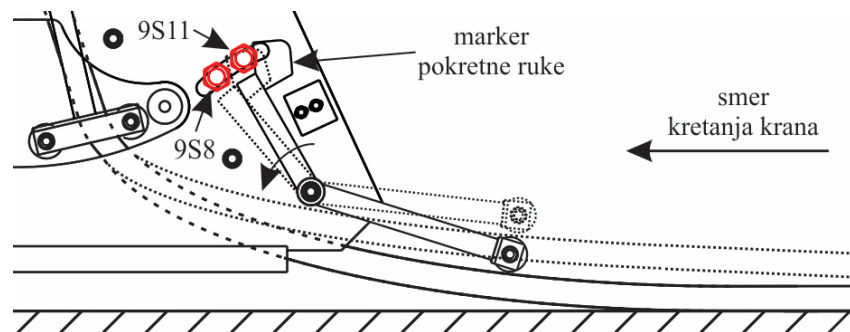
Kao posledica opisane kompenzacije poremećaja, vrednost zadatog momenta motora sve vreme se menja u uskim granicama. To dovodi do male promene položaja pokretne ruke, a samim tim i do promene sile zatezanja kabla u uskim granicama oko podešene vrednosti.

Ukoliko se, pri kretanju kрана, desi otkaz pogona kabl-bubnja, može da dođe do znatnog pretezanja kabla, sa silom zatezanja većom od maksimalno dopuštene vrednosti, što prouzrokuje oštećenje ili, u krajnjem slučaju, kidanja kabla. Da bi se to sprečilo, potrebno je realizovati zaštitu od pretezanja kabla.

Za zaštitu od pretezanja kabla, a u skladu sa prethodnom analizom, može biti iskorišćena postojeća pokretna ruka uvodnika sa odgovarajućim polužnim davačem. Ustvari, s obzirom da uvodnik kabl-bubnja ima dve pokretne ruke, treba primeniti po jedan polužni davač za svaku, a za položaje kрана desno i levo u odnosu na priključno mesto, 9S7 i 9S8 respektivno (slika 4.15).

Položaj polužnih davača za zaštitu od pretezanja kabla, 9S7 i 9S8, bira se u skladu sa maksimalno dopuštenom statičkom silom zatezanja kabla. Ideja je da sila zatezanja kabla, koja odgovara položaju pokretne ruke pri kojem polužni davač postaje aktivan, bude manja od maksimalno dopuštene statičke sile zatezanja kabla. Ukoliko polužni davač nije aktivan, kabl nije pretegnut i kran može da se kreće. Ako je polužni davač aktivan, kabl je pretegnut i kretanje kрана mora da se blokira.

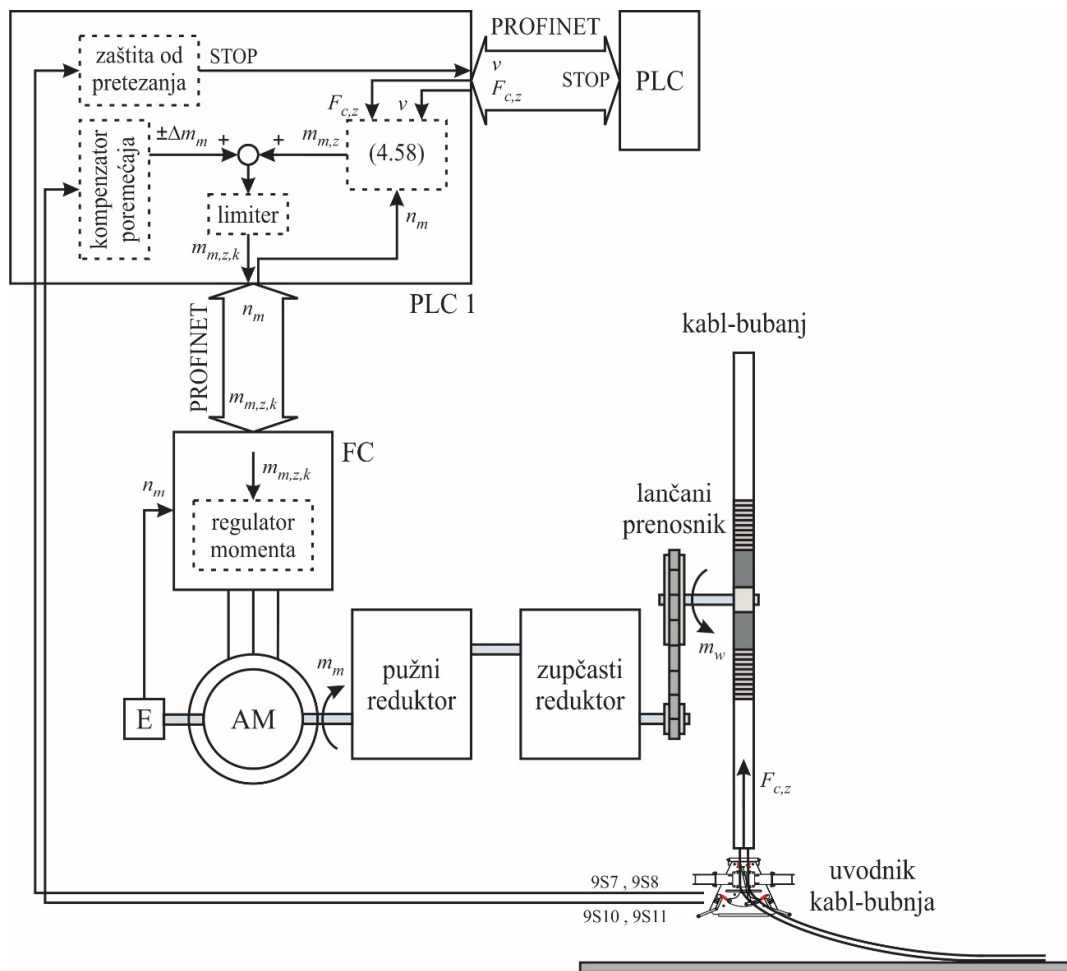
Na slici 4.17 ilustrovana je opisana procedura zaštite od pretezanja kabla, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto. Neka je u početnom trenutku marker pokretne ruke van polužnog davača 9S8, što znači da polužni davač nije aktivan. Kran može da se kreće. Ako se kran kreće u smeru levo i u nekom trenutku dođe do otkaza pogona kabl-bubnja, ima se povećanje sile zatezanja kabla i rotacija pokretne ruke u smeru suprotnom od smera kazaljke na satu. Marker pokretne ruke dolazi na polužni davač 9S8, što ga aktivira. Kran se zaustavlja.



Slika 4.17. Pokretna ruka uvodnika kabl-bubnja – zaštita od pretezanja kabla

Kao posledica opisane zaštite od pretezanja kabla, kada sila zatezanja kabla dostigne podešenu vrednost, ima se blokada kretanja kрана.

Na slici 4.18 prikazana je principijelna blok šema opisanog algoritma upravljanja pogonom kabl-bubnja, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto. Pogonom kabl-bubnja upravlja se posebnim PLC-om, PLC 1. U njemu se, na osnovu zadate vrednosti sile zatezanja kabla, $F_{c,z}$, i brzine kretanja kрана, v , (ili brzine obrtanja motora, n_m), u svakom procesorskom ciklusu računa zadati moment motora, $m_{m,z}$, a korišćenjem izraza 4.58. Proračunata vrednost se koriguje kompenzatorom poremećaja, $\pm \Delta m_m$, a na osnovu položaja pokretne ruke uvodnika kabl-bubnja, 9S11. Kompenzovana vrednost zadatog momenta motora, $m_{m,z,k}$, prosleđuje se frekvencijskom pretvaraču, koji radi u režimu po momentu, a sa zatvorenim povratnom vezom po brzini zbog bolje estimacije momenta. Ukoliko dođe do pretezanja kabla, što se detektuje na osnovu položaja pokretne ruke uvodnika kabl-bubnja, 9S8, zaštita od pretezanja blokira kretanje kрана.



Slika 4.18. Principijelna blok šema algoritma upravljanja pogonom kabl-bubnja

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti sledeće: da bi se pri namotavanju/odmotavanju kabla, u svim režimima rada pogona kabl-bubnja, imala konstantna sila zatezanja kabla, moment motora treba da ima vrednost u skladu sa izrazom 4.58, sa izvršenom kompenzacijom poremećaja i zaštitom od pretezanja kabla. Takođe, proračun zadatog momenta motora korišćenjem izraza 4.58 u svakom procesorskom ciklusu zahteva dosta procesorskog vremena, pa je za pogon kabl-bubnja neophodna ugradnja posebnog PLC-a, adekvatnih performansi.

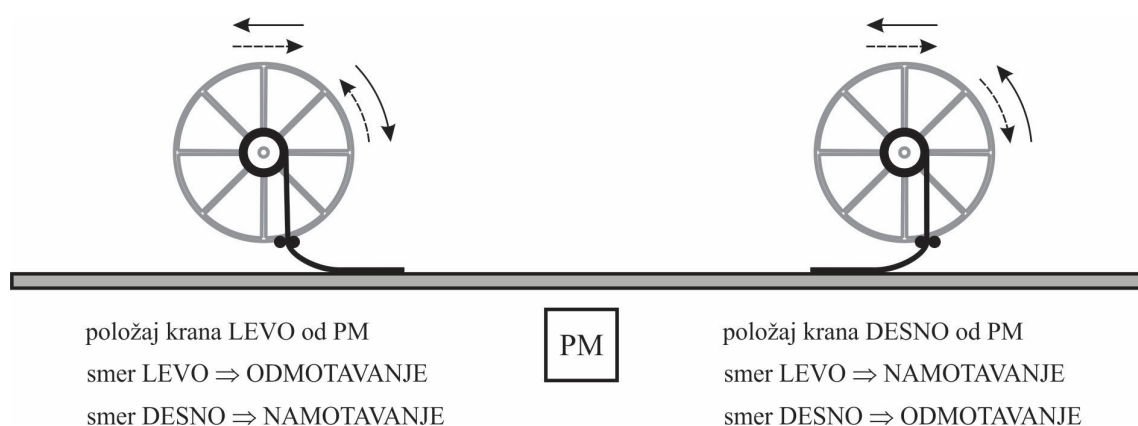
Ovde se, imajući u vidu da je vrednost iz izraza 4.58 potrebno kompenzovati, postavlja pitanje ekonomske opravdanosti ugradnje posebnog PLC-a za pogon kabl-bubnja. Nameće se ideja da se proračun zadatog momenta motora korišćenjem izraza 4.58 u svakom procesorskom ciklusu, zameni konstantnom, unapred sračunatom vrednošću momenta motora, koja će da predstavlja polaznu vrednost za kompenzator poremećaja. Sa dovoljno brzim kompenzatorom poremećaja, za

kratko vreme imaće se željena sila zatezanja kabla. Na ovaj način, ugradnja posebnog PLC-a za pogon kabl-bubnja može biti izbegnuta, i to ne na račun bitnog smanjenja performansi.

Značajno ubrzanje kompenzatora poremećaja imaće se ukoliko se on, umesto u PLC-u, projektuje u frekvencijskom pretvaraču, s obzirom da je procesorski ciklus frekvencijskog pretvarača mnogo kraći.

Takođe, uspostavljanje željene sile zatezanja kabla biće ubrzano i ukoliko se umesto jedne konstantne vrednosti momenta motora koriste dve, za namotavanje i za odmotavanje kabla, a imajući u vidu da se momenti motora pri namotavanju i odmotavanju, u skladu sa slikom 4.12 (ili tabelom 4.5), bitno razlikuju. U ovom slučaju, informacija o namotavanju/odmotavanju kabla mora da bude poznata pre pokretanja kрана i pogona kabl-bubnja, a može da se odredi na osnovu zadatog smera kretanja kрана i položaja kрана u odnosu na priključno mesto.

Detekcija namotavanja/odmotavanja kabla ilustrovana je na slici 4.19. Neka je, na primer, zadati smer kretanja kрана desno. Ukoliko se kran nalazi levo u odnosu na priključno mesto, kabl treba da se namotava na kabl-bubanj.



Slika 4.19. Namotavanje/odmotavanje kabla – detekcija

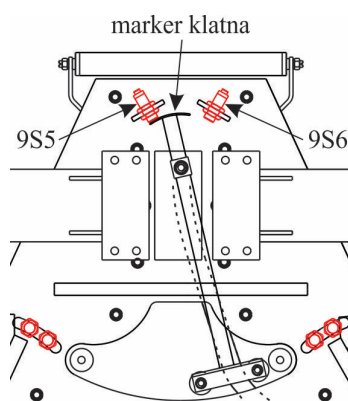
Zadati smer kretanja kрана određen je položajem pripadajućeg upravljačkog uređaja (palicom rukovaoca za pogon kretanja).

U cilju određivanja položaja kрана u odnosu na priključno mesto, analiziran je rad uvodnika kabl-bubnja sa slike 4.15. Zaključak je da položaj klatna uvodnika zavisi od položaja kрана. Samim tim, za određivanja položaja kрана može biti iskorišćeno klatno uvodnika sa

odgovarajućim induktivnim davačima, a za položaje kрана лево и десно у односу на прикључно место, 9S5 и 9S6 респективно.

Положај индуктивних давача за детекцију положаја крана, 9S5 и 9S6, бира се близу вертикалне осе уводника и то тако да их активира извођење клатна из осе, при чему истовремено оба давача не могу да буду активна. Активирањем једног од индуктивних давача, детектује се положај крана у односу на прикључно место. Детектовани положај је “на снази” док се не активира други индуктивни давач.

На слици 4.20 илустрована је описана процедура за детекцију положаја крана. С обзиром на положај клатна уводника, маркер клатна је на индуктивном давачу 9S5 и он је активан. Детектован је положај крана лево у односу на прикључно место.



Slika 4.20. Klatno uvodnika kabl-bubnja – detekcija položaja kрана

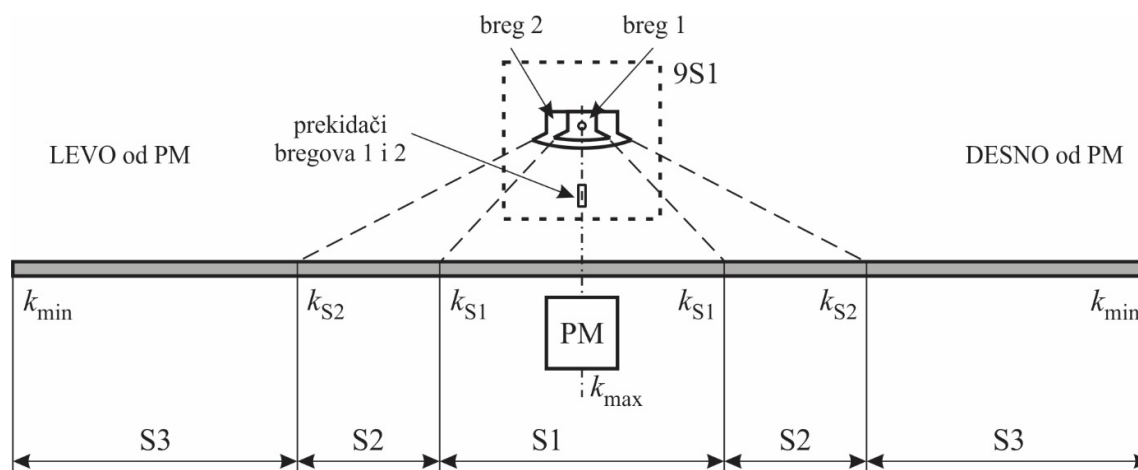
Ukoliko su oba induktivna davača za detekciju položaja kрана u odnosu na priključno mesto aktivna, došlo je do greške i ima se blokada kretanja kрана.

Uspostavljanje željene sile zatezanja kabla dodatno može biti ubrzano ukoliko se umesto jedne konstantne vrednosti momenta motora za namotavanje i jedne za odmotavanje kabla, koristi više vrednosti, a imajući u vidu vrednosti potrebnog momenta motora iz tabele 4.5 (ili sa slike 4.12). U ovom slučaju, konstantna vrednost momenta motora, koja predstavlja polaznu vrednost za kompenzator poremećaja, mora da bude poznata pre pokretanja kрана i pogona kabl-bubnja, a može da se odredi na osnovu broja namota kabla na kabl-bubnju, u skladu sa podacima iz tabele 4.5.

U cilju detekcije broja namota kabla na kabl-bubnju, kranska staza treba da se podeli na određeni broj sektora, koji odgovara broju željenih konstantnih vrednosti momenta motora za namotavanje/odmotavanje kabla. Podela kranske staze na sektore vrši se simetrično u odnosu na priključno mesto. Detekcija broja namota kabla potrebna je na granicama sektora i za to može biti iskorišćen vretenasti bregasti prekidač sa odgovarajućim brojem bregova, koji treba da je za jedan manji od željenog broja sektora.

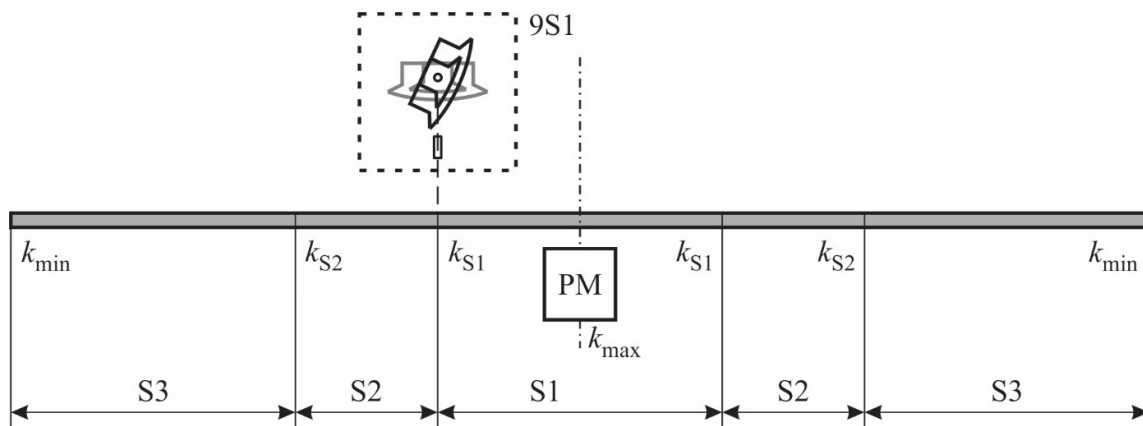
Položaj bregova vretenastog bregastog prekidača podešava se pri položaju kрана pored priključnog mesta i to tako da se u osi bregova nalaze pripadajući prekidači, a u cilju dobijanja sektora simetričnih u odnosu na priključno mesto. Veličina sektora, odnosno broj namota kabla na granicama sektora, bira se izborom bregova odgovarajućeg ugla.

Na slici 4.21 ilustrovana je podela kranske staze na tri sektora primenom vretenastog bregastog prekidača sa dva brega, 9S1. Bregovi su odgovarajućih uglova, u skladu sa željenim veličinama sektora. Položaj kрана je pored priključnog mesta, a bregovi su podešeni tako da se u njihovoj osi nalaze pripadajući prekidači. Prekidači brega 1 i brega 2 su aktivni, i kran se nalazi u sektoru S1 (slika 4.21).

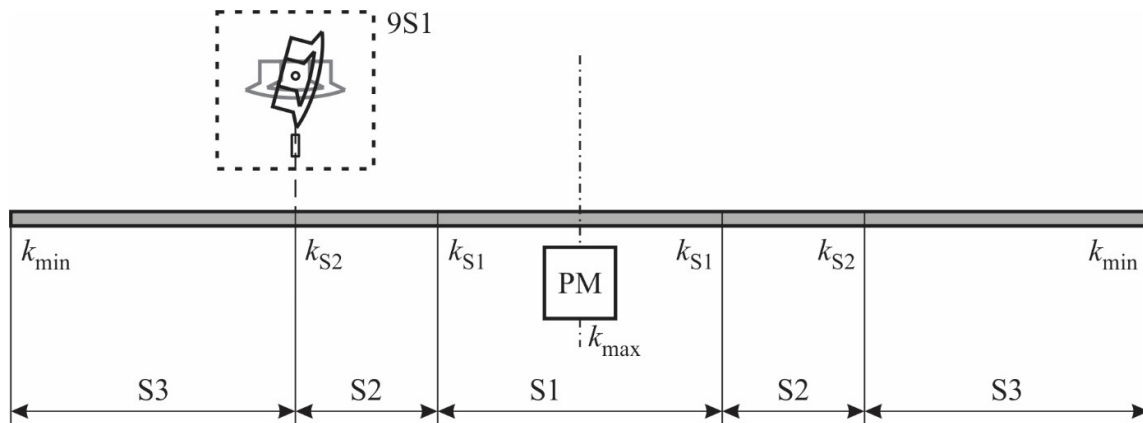


Slika 4.21. Podela kranske staze na tri sektora primenom vretenastog bregastog prekidača

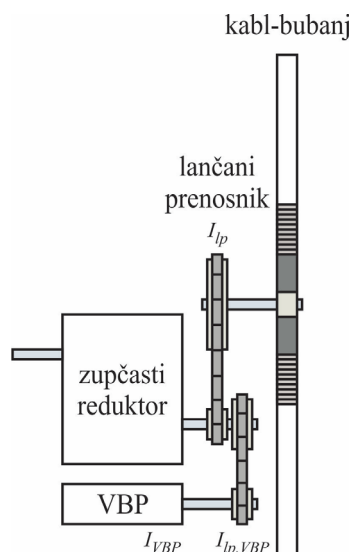
Neka se, na primer, kran kreće u smeru levo. Kabl-bubanj se obrće, omogućavajući odmotavanje kabla, a usled obrtanja kabl-bubnja ima se obrtanje i bregova vretenastog bregastog prekidača. U određenom trenutku, prikazanom na slici 4.22, prekidač brega 1 postaje neaktivan. Ima se prelazak kрана iz sektora S1 u sektor S2 i to pri broju namota kabla na kabl-bubnju k_{S1} .

Slika 4.22. Broj namota kabla na kabl-bubnju k_{S1}

Neka je kretanje kрана u smeru levo nastavljeno. Kabl-bubanj se i dalje obrće, omogućavajući odmotavanje kabla, a usled obrtanja kabl-bubnja ima se obrtanje i bregova vretenastog bregastog prekidača. U određenom trenutku, prikazanom na slici 4.23, i prekidač brega 2 postaje neaktivan. Ima se prelazak kрана iz sektora S2 u sektor S3 i to pri broju namota kabla na kabl-bubnju k_{S2} .

Slika 4.23. Broj namota kabla na kabl-bubnju k_{S2}

Na slici 4.24 prikazana je principijelna blok šema veze vretenastog bregastog prekidača za detekciju broja namota kabla na granicama sektora. Vretenasti bregasti prekidač (VBP) je prenosnog odnosa I_{VBP} , a vezan je na izlazno vratilo zupčastog reduktora primenom lančanog prenosnika prenosnog odnosa $I_{lp,VBP}$.



Slika 4.24. Principijelna blok šema veze vretenastog bregastog prekidača

Neka je kranska staza podjeljena na tri sektora primenom dva brega (slika 4.21). U cilju izbora ugla bregova, a u skladu sa vrednostima potrebnog momenta motora iz tabele 4.5, usvajaju se željeni brojevi namota kabla na kabl-bubnju na granicama sektora $k_{S1,z}$ i $k_{S2,z}$.

Proračun potrebnog ugla bregova, $\alpha_{S1,z}$ i $\alpha_{S2,z}$, a na osnovu željenog broja namota kabla na granicama sektora, vrši se primenom sledećeg izraza:

$$\alpha_{Si,z} = \left(I_{lp} \cdot \frac{1}{I_{lp,VBP}} \cdot \frac{1}{I_{VBP}} \cdot \right) \cdot (k_{\max} - k_{Si,z}) \cdot 2 \cdot 360^\circ, \quad (4.68)$$

gde je $i = 1, 2$.

Imajući u vidu raspoložive standardne veličine bregova, treba usvojiti bregove sa uglovima α_{S1} i α_{S2} , najbliže proračunatim vrednostima.

Proračun broja namota kabla na kabl-bubnju na granicama sektora, k_{S1} i k_{S2} , a na osnovu usvojene veličine bregova, vrši se primenom sledećeg izraza:

$$k_{Si} = k_{\max} - \left[\left(\frac{1}{I_{lp}} \cdot I_{lp,VBP} \cdot I_{VBP} \right) \cdot \alpha_{Si} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{360^\circ} \right]. \quad (4.69)$$

Udaljenost krana levo i desno od priključnog mesta pri promeni sektora, $L_{pm,S1}$ i $L_{pm,S2}$, može da se odredi na sledeći način:

$$L_{pm,Si} = L_c(k_{\max}) - L_c(k_{Si}), \quad (4.70)$$

pri čemu se vrednosti $L_c(k_{\max})$ i $L_c(k_{Si})$ računaju korišćenjem izraza 4.9.

Prelazak kрана iz sektora S1 u sektor S2 i iz sektora S2 u sektor S3 ima se pri broju namota kabla na kabl-bubnju k_{S1} i k_{S2} respektivno, a na udaljenostima kрана levo i desno od priključnog mesta $L_{pm,S1}$ i $L_{pm,S2}$ respektivno.

Pri izboru konstantnih vrednosti momenta motora za namotavanje i za odmotavanje kabla u pojedinim sektorima kranske staze, a na osnovu vrednosti potrebnog momenta motora iz tabele 4.5, treba voditi računa o sledećem:

- Da bi se pri pokretanju kрана sprečilo nekontrolisano odmotavanje kabla sa kabl-bubnja, treba razmatrati režim zaletanja pri namotavanju kabla i režim kočenja pri odmotavanju kabla.
- Da bi se sprečilo pretezanje kabla, za svaki sektor kranske staze treba odabrati najmanju vrednost momenta motora iz razmatranih režima.

S obzirom da je kranska staza podeljena na tri sektora, potrebno je usvojiti tri konstantne vrednosti momenta motora za namotavanje i tri za odmotavanje kabla, a imajući u vidu vrednosti potrebnog momenta motora iz tabele 4.5. U skladu sa prethodnom analizom, usvajaju se konstantne vrednosti momenta motora, koje predstavljaju polazne vrednosti za kompenzator poremećaja (primer: tabela 4.7).

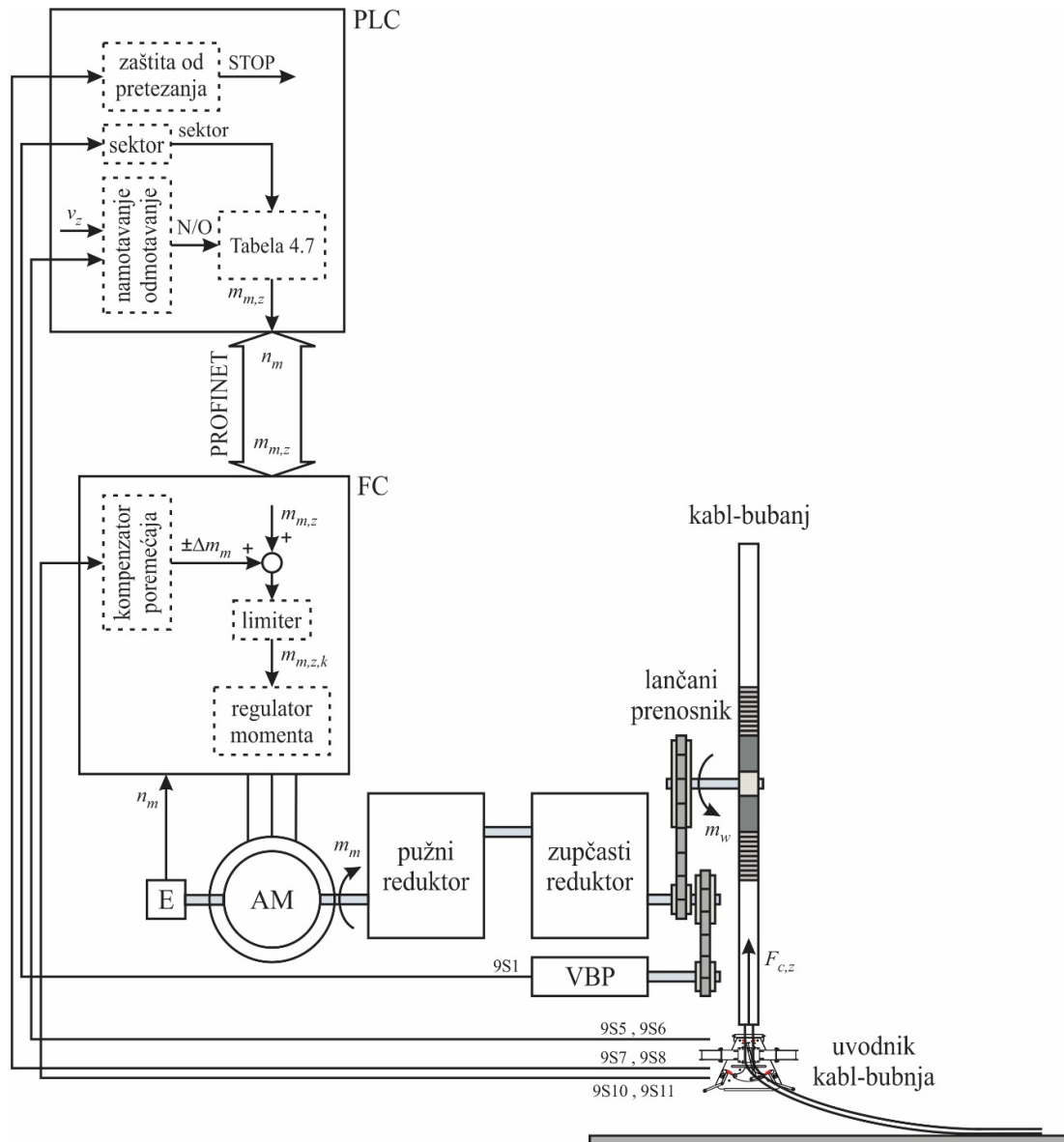
Na slici 4.25 prikazana je principijelna blok šema modifikovanog algoritma upravljanja pogonom kabl-bubnja, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto. Pogonom kabl-bubnja upravlja se PLC-om, a posredstvom frekvencijskog pretvarača, koji radi u režimu po momentu, sa zatvorenom povratnom vezom po brzini zbog bolje estimacije momenta.

Pri postavljanju upravljačkog uređaja za pogon kretanja u željeni položaj, različit od nultog, u PLC-u se, primenom vretenastog bregastog prekidača 9S1, detektuje sektor kranske staze u kojem se kran nalazi. Takođe, na osnovu položaja upravljačkog uređaja i stanja induktivnih davača za detekciju položaja kрана u odnosu na priključno mesto, 9S5 i 9S6, generiše se informacija o potrebi za namotavanjem/odmotavanjem kabla. Korišćenjem informacija o sektoru i potrebi za namotavanjem/odmotavanjem kabla, a primenom tabele 4.7, bira se zadata konstantna vrednost momenta motora, $m_{m,z}$, koja se prosleđuje frekvencijskom pretvaraču.

Frekvencijski pretvarač pokreće pogon kabl-bubnja, nakon čega se pogonu kretanja daje dozvola za rad. Po pokretanju pogona kabl-bubnja, a na osnovu stanja induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja, 9S10 i 9S11, zadata konstantna vrednost momenta motora, $m_{m,z}$, se koriguje kompenzatorom poremećaja, $\pm\Delta m_m$. Kompenzovana vrednost zadatog momenta motora,

$m_{m,z,k}$, prosleđuje se regulatoru momenta, koji ima funkciju da upravo ovaj moment obezbedi na vratilu motora.

Ukoliko u bilo kom trenutku dođe do pretezanja kabla, što se detektuje na osnovu stanja polužnih davača za zaštitu od pretezanja kabla, 9S7 i 9S8, rad pogona kretanja i pogona kabl-bubnja se blokira.



Slika 4.25. Principijelna blok šema modifikovanog algoritma upravljanja pogonom kabl-bubnja

4.3.1. Primer proračuna za potrebe algoritma upravljanja kod pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004

Upravljanje pogonom kabl-bubnja na Derik kranu DK004 realizovano je po momentu bez davača sile zatezanja kabla (indirektna regulacija sile zatezanja). Primenjen je modifikovani algoritam upravljanja pogonom kabl-bubnja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 4.25.

U skladu sa izabranim motorom i vrstom pogona, za napajanje motora iskorišćen je invertorski modul 6SL3120-1TE21-8AA4 od 18 A, serije SINAMICS S120, proizvođača Siemens, na zajedničkom DC Bus-u, sa Drive CLiQ komunikacijom prema kontrolnoj jedinici CU320-2 PN.

Frekvencijski pretvarač radi u režimu po momentu, a sa zatvorenim povratnom vezom po brzini motora koju obezbeđuje enkoder. Enkoder je montiran na motor za pogon kabl-bubnja, HTL tipa je i ima 1024 impulsa po obrtaju.

Radom frekvencijskog pretvarača upravlja PLC sistem sa procesorom CPU 315-2 PN/DP, serije S7-300, proizvođača Siemens. Komunikacija između PLC-a i pretvarača realizovana je PROFINET mrežom.

Kranska staza je podeljena na tri sektora.

Za detekciju broja namota kabla na granicama sektora, primenjen je vretenasti bregasti prekidač sa dva brega G150-220, proizvođača SCHMERSAL. Vretenasti bregasti prekidač je prenosnog odnosa $I_{VBP} = 220$, a vezan je na izlazno vratilo zupčastog reduktora primenom lančanog prenosnika prenosnog odnosa $I_{lp,VBP} = \frac{25}{37}$ (slika 4.24).

U cilju izbora ugla bregova, a u skladu sa vrednostima potrebnog momenta motora iz tabele 4.5, usvojeni su željeni brojevi namota kabla na kabl-bubnju na granicama sektora: $k_{S1,z} = 29$ i $k_{S2,z} = 23$.

Za željene brojeve namota kabla na kabl-bubnju na granicama sektora $k_{S1,z} = 29$ i $k_{S2,z} = 23$ potrebno je primeniti bregove sa uglovima $\alpha_{S1,z} = 55.6121^\circ$ i $\alpha_{S2,z} = 122.3467^\circ$ respektivno (izraz 4.68).

Imajući u vidu raspoložive standardne veličine bregova, usvojeni su bregovi sa uglovima $\alpha_{S1} = 60^\circ$ i $\alpha_{S2} = 120^\circ$.

Za usvojene bregove sa uglovima $\alpha_{S1} = 60^\circ$ i $\alpha_{S2} = 120^\circ$, brojevi namota kabla na granicama sektora iznose $k_{S1} = 28.6055$ i $k_{S2} = 23.2110$ respektivno (izraz 4.69).

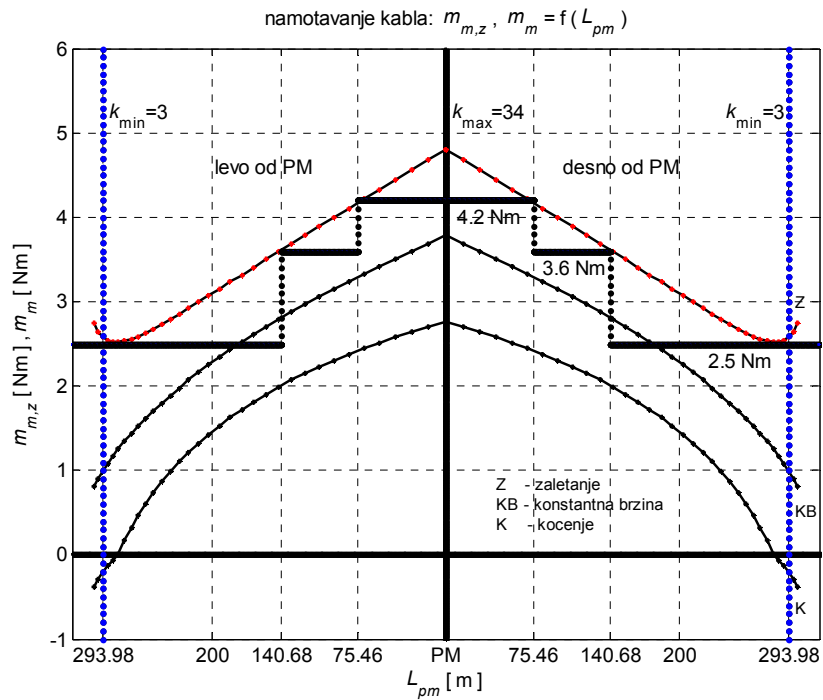
Prelazak kрана iz sektora S1 u sektor S2 i iz sektora S2 u sektor S3 ima se pri broju namota kabla na kabl-bubnju k_{S1} i k_{S2} respektivno, a na udaljenostima kрана levo i desno od priključnog mesta $L_{pm,S1} = 75.4582$ m i $L_{pm,S2} = 140.6770$ m respektivno (izraz 4.70).

Usvojene konstantne vrednosti momenta motora, koje predstavljaju polazne vrednosti za kompenzator poremećaja, date su u tabeli 4.7.

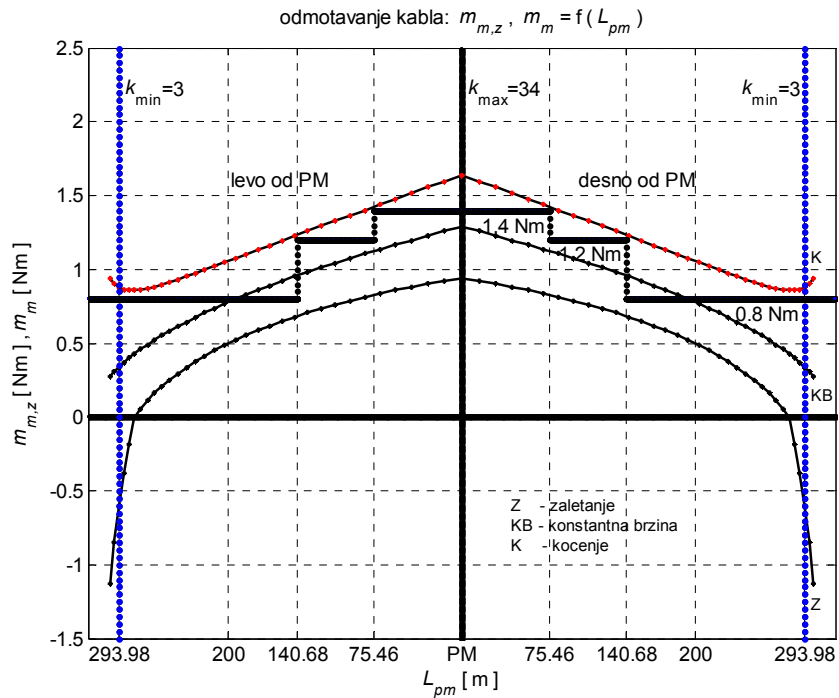
Tabela 4.7. Konstantne vrednosti momenta motora za tri sektora kranske staze

sektor	$m_{m,z}$ [Nm]	
	namotavanje	odmotavanje
S3	2.5	0.8
S2	3.6	1.2
S1	4.2	1.4

Zavisnosti usvojenih konstantnih vrednosti momenta motora za namotavanje/odmotavanje kabla i potrebnog momenta motora od udaljenosti kрана levo i desno od priključnog mesta, $m_{m,z} = f(L_{pm})$ i $m_m = f(L_{pm})$, dobijene korišćenjem tabela 4.7 i 4.5 i izraza 4.9 i 4.70, a za $k = 1 \div 34$ i pri konstantnoj sili zatezanja kabla od 299.2050 N, prikazane su na slikama 4.26 i 4.27.



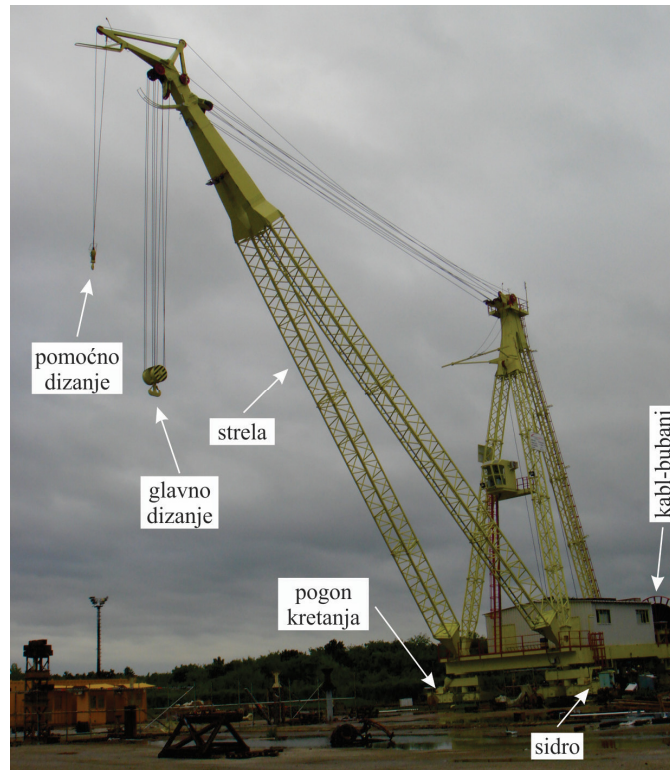
Slika 4.26. Zavisnosti $m_{m,z} = f(L_{pm})$ i $m_m = f(L_{pm})$ – namotavanje kabela



Slika 4.27. Zavisnosti $m_{m,z} = f(L_{pm})$ i $m_m = f(L_{pm})$ – odmotavanje kabela

4.4. Praktična realizacija pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004

Derik kran DK004 instaliran je na montažnom placu u RB Kolubara (slika 4.28). Pre svega, namenjen je za montažu rudarske opreme.



Slika 4.28. Derik kran DK004 na montažnom placu u RB Kolubara

Derik kran DK004 poseduje sledeće pogone:

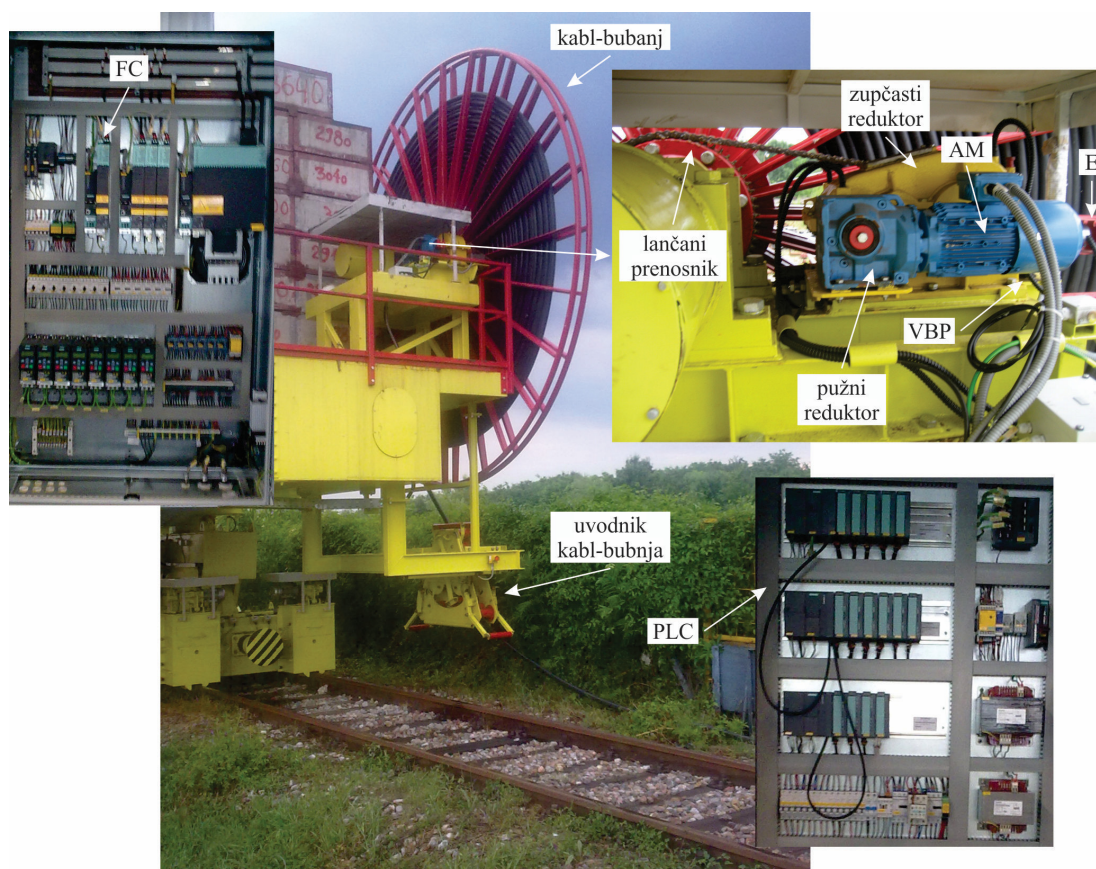
- Pogon glavnog dizanja: maksimalna nosivost 60 t, visina dizanja 46 m, maksimalna brzina dizanja 6.27 m/min.
- Pogon pomoćnog dizanja: nosivost 12.5 t, visina dizanja 49.2 m, maksimalna brzina dizanja 6.27 m/min.
- Pogon promene dohvata: promena ugla nagiba strele u opsegu $82.5^\circ \div 31.5^\circ$.
- Pogon kretanja: maksimalna brzina kretanja 14.27 m/min.
- Pogon kabl-bubnja: dužina kranske staze 500 m, sa priključnim mestom na sredini.
- Pogon sidrenja: uklještenje za šinu u osam tačaka kleštima na električni i mehanički pogon.

Derik kran DK004 je pogonske klase II.

Instalisana snaga kрана je 318 kW, dok maksimalna jednovremena snaga iznosi 136.5 kW. Napajanje kрана je kablom 4x95 mm².

Za pokretanje svih pogona kрана primenjeni su odgovarajući frekvencijski pretvarači, a za upravljanje radom celog kрана iskorišćen je jedan PLC adekvatnih performansi.

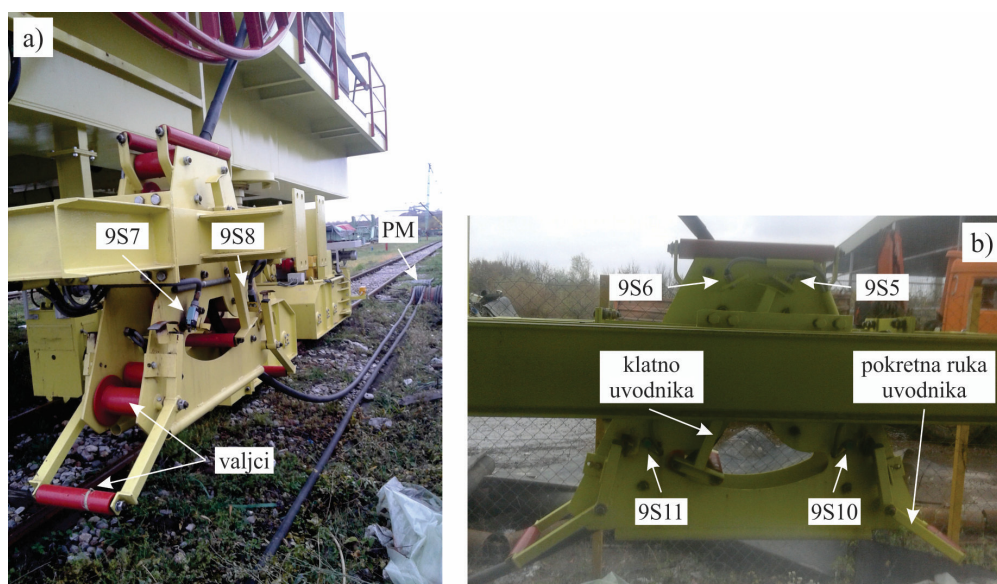
Pogon kabl-bubnja Derik kрана DK004, sa svim pripadajućim elementima, prikazan je na slici 4.29.



Slika 4.29. Derik kran DK004 – pogon kabl-bubnja

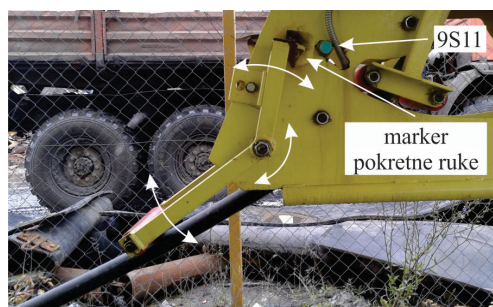
Uvodnik kabl-bubnja Derik kрана DK004, sa svim pripadajućim elementima, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto, prikazan je na slici 4.30.

Na slici 4.31 prikazan je mehanizam za kompenzaciju poremećaja, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto (pogled otpozadi). Marker pokretne ruke nalazi se van induktivnog davača 9S11, što znači da induktivni davač nije aktivan. Zadati moment motora treba povećati, usled čega će doći do izvesnog povećanja sile zatezanja kabla i blage rotacije pokretne ruke u smeru kazaljke na satu.



Slika 4.30. Uvodnik kabl-bubnja – kran levo u odnosu na priključno mesto

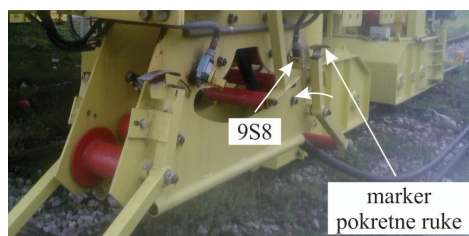
a) pogled spreda, b) pogled otopozadi



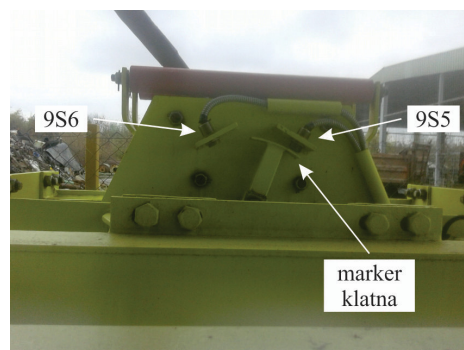
Slika 4.31. Pokretna ruka uvodnika kabl-bubnja – kompenzacija poremećaja (pogled otopozadi)

Na slici 4.32 prikazan je mehanizam za zaštitu od pretezanja kabla, a za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto (pogled spreda). Marker pokretne ruke nalazi se van polužnog davača 9S8, što znači da polužni davač nije aktivan. Kran može da se kreće. Ako se kran kreće u smeru levo i u nekom trenutku dođe do otkaza pogona kabl-bubnja, ima se povećanje sile zatezanja kabla i rotacija pokretne ruke u smeru suprotnom od smera kazaljke na satu. Marker pokretne ruke dolazi na polužni davač 9S8, što ga aktivira. Kran se zaustavlja.

Na slici 4.33 prikazan je mehanizam za detekciju položaja kрана u odnosu na priključno mesto (pogled otopozadi). S obzirom na položaj klatna uvodnika, marker klatna je na induktivnom davaču 9S5 i on je aktivan. Detektovan je položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto.



Slika 4.32. Pokretna ruka uvodnika kabl-bubnja – zaštita od pretezanja kabla (pogled spreda)



Slika 4.33. Klatno uvodnika kabl-bubnja – detekcija položaja kрана (pogled otpozadi)

Na slici 4.34 prikazan je vretenasti bregasti prekidač, 9S1, iskorišćen za detekciju broja namota kabla na granicama sektora kranske staze. Vretenasti bregasti prekidač vezan je na izlazno vratilo zupčastog reduktora primenom sopstvenog lančanog prenosnika.



Slika 4.34. Vretenasti bregasti prekidač – detekcija broja namota kabla na granicama sektora

Napomena: deo PLC programa sa Derik kрана DK004, kojim se realizuje upravljanje pogonom kabl-bubnja primenom modifikovanog algoritma, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 4.25, dat je u Prilogu 5.

4.5. Eksperimentalni rezultati za pogon kabl-bubnja na Derik kranu DK004

Za pogon kabl-bubnja na Derik kranu DK004 primenjen je modifikovani algoritam upravljanja, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 4.25.

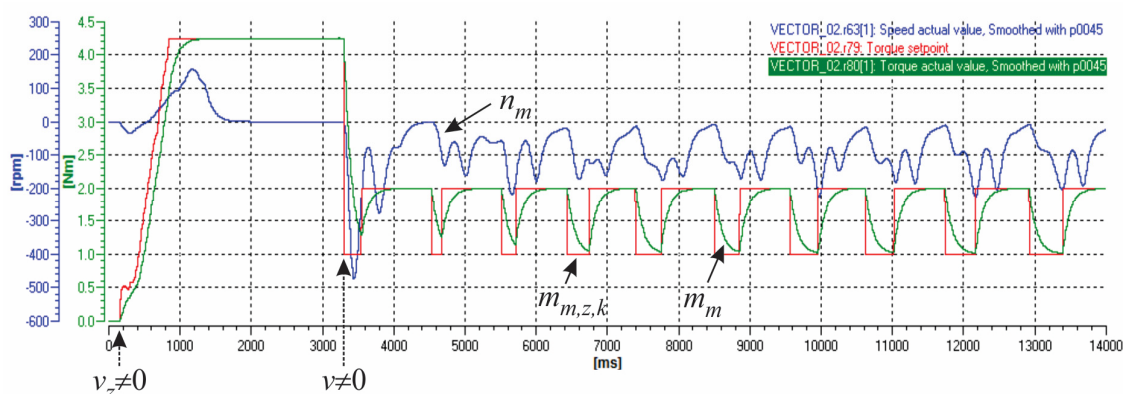
Pre puštanja u rad pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004 eksperimentalno treba podesiti položaj induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja, 9S10 i 9S11, položaj polužnih davača za zaštitu od pretezanja kabla, 9S7 i 9S8, položaj induktivnih davača za detekciju položaja kрана u odnosu na priključno mesto, 9S5 i 9S6, i položaj bregova vretenastog bregastog prekidača za podelu kranske staze na sektore, 9S1, a na ranije opisan način. Takođe, eksperimentalno treba proveriti usvojene konstantne vrednosti momenta motora date u tabeli 4.7, koje predstavljaju polazne vrednosti za kompenzator poremećaja, i po potrebi ih korigovati. Na kraju, imajući u vidu ove vrednosti, eksperimentalno treba podesiti limiter kompenzovane vrednosti zadatog momenta motora, i to posebno za svaki sektor kranske staze pri namotavanju/odmotavanju kabla.

U cilju utvrđivanja performansi pogona kabl-bubnja, a nakon puštanja u rad Derik kрана DK004, snimljene su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina i to posredstvom frekvencijskog pretvarača, a korišćenjem softvera “Drive ES – Starter”, proizvođača Siemens.

Na slikama 4.35 do 4.38 prikazane su vremenske zavisnosti zadatog momenta motora (Torque setpoint - $m_{m,z,k}$), filtrirane vrednosti estimiranog momenta motora (Torque actual value, Smoothed with p0045 - m_m) i filtrirane vrednosti brzine obrtanja motora (Speed actual value, Smoothed with p0045 - n_m), sa vremenskom konstantom filtra od 100 ms.

Vremenske zavisnosti su snimljene za položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto, a pri broju namota kabla na kabl-bubnju $k \approx 26$, odnosno za sektor S2. Usvojene konstantne vrednosti momenta motora, koje predstavljaju polazne vrednosti za kompenzator poremećaja, nisu korigovane i odgovaraju vrednostima iz tabele 4.7. Eksperimentalno određene minimalne i maksimalne vrednosti za limiter kompenzovane vrednosti zadatog momenta motora, a za sektor S2, iznose 3.25 Nm i 4.25 Nm pri namotavanju, odnosno 1 Nm i 2 Nm pri odmotavanju kabla.

Na slici 4.35 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla, a za minimalnu brzinu kretanja kрана, $v_{\min} = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Slika 4.35. Vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla, $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

U trenutku $t \approx 0.15$ s upravljački uređaj za pogon kretanja kрана (palica rukovaoca za pogon kretanja) prebačen je iz nultog položaja u položaj koji odgovara zadatom smeru kretanja kрана levo u odnosu na kabinu dizaličara i zadatoj brzini kretanja kрана $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Primenom vretenastog bregastog prekidača 9S1, detektovan je položaj kрана u sektoru kranske staze S2.

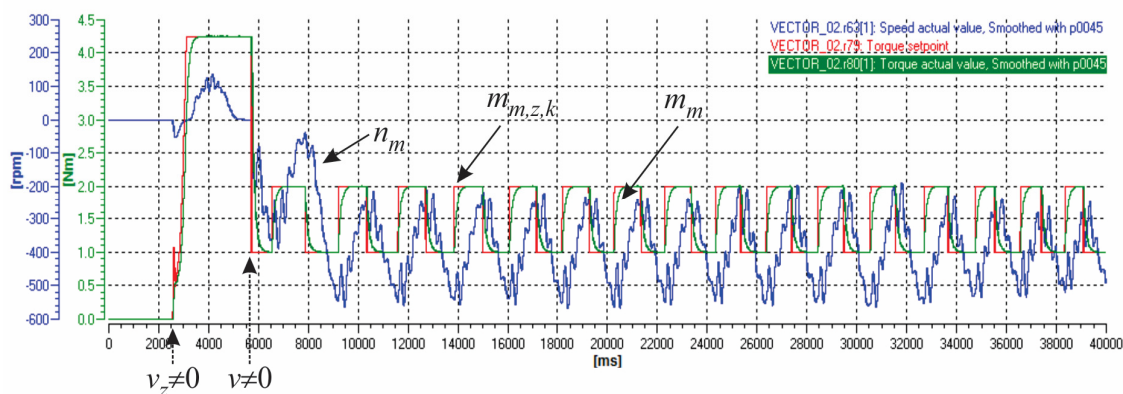
U cilju određivanja položaja kрана u odnosu na priključno mesto, pre pokretanja kрана vrši se zatezanje (namotavanje) kabla sa vrednostima za zadati moment motora koje odgovaraju detektovanom sektoru kranske staze. Imajući u vidu da je položaj kрана u sektoru kranske staze S2, zadata konstantna vrednost momenta motora od 3.6 Nm koriguje se kompenzatorom poremećaja na osnovu stanja induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja 9S10 i 9S11, a zatim se limitira u podešenom opsegu (3.25 Nm ÷ 4.25 Nm). Dobijena kompenzovana vrednost zadatog momenta motora, $m_{m,z,k}$, prosleđuje se regulatoru momenta i predstavlja zadati moment motora (Torque setpoint). S obzirom da se kran ne kreće, zadati moment motora pri zatezanju kabla uvek dostiže maksimalnu vrednost. U trenutku $t \approx 2$ s marker klatna uvođnika kabl-bubnja aktivira induktivni davač 9S5, detektovan je položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto i zatezanje kabla se završava, a pogonu kretanja se daje dozvola za rad.

U skladu sa položajem upravljačkog uređaja, kran počinje sa kretanjem u smeru levo ($v \neq 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), a sa zadatom brzinom kretanja $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($t \approx 3.3$ s). S obzirom da je zadati smer kretanja kрана levo u odnosu na kabinu dizaličara i da je položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto, ima se odmotavanje kabla sa vrednostima za zadati moment motora koje odgovaraju detektovanom sektoru kranske staze. Imajući u vidu da je položaj kрана u sektoru kranske staze S2, zadata

konstantna vrednost momenta motora od 1.2 Nm koriguje se kompenzatorom poremećaja na osnovu stanja induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja 9S10 i 9S11, a zatim se limitira u podešenom opsegu (1 Nm ÷ 2 Nm). Dobijena kompenzovana vrednost zadatog momenta motora, $m_{m,z,k}$, prosleđuje se regulatoru momenta i predstavlja zadati moment motora (Torque setpoint).

Analizom slike 4.35 može se zaključiti da je vremenska zavisnost zadatog momenta motora (Torque setpoint - $m_{m,z,k}$) u skladu sa prethodnim razmatranjem. Takođe, može se zaključiti da moment motora (Torque actual value, Smoothed with p0045 - m_m) “dobro” prati zadatu vrednost. Promena vrednosti momenta motora u podešenom opsegu za posledicu ima promenu brzine obrtanja motora (Speed actual value, Smoothed with p0045 - n_m). Sa slike 4.35 može da se proceni srednja vrednost brzine obrtanja motora na oko -100 $^{\circ}/\text{min}$, što je u skladu sa odgovarajućom proračunskom vrednošću iz tabele 4.6, -95.9098 $^{\circ}/\text{min}$.

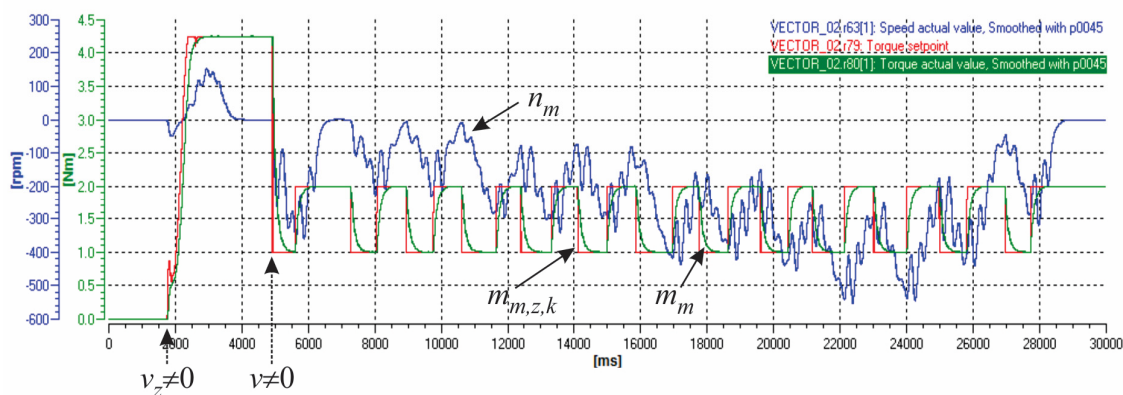
Na slici 4.36 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla, a za maksimalnu brzinu kretanja kрана, $v_{\max} = 0.25$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Slika 4.36. Vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla, $v_z = 0.25$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Analizom slike 4.36 može se zaključiti da je vremenska zavisnost zadatog momenta motora (Torque setpoint - $m_{m,z,k}$) u skladu sa prethodnim razmatranjem. Takođe, može se zaključiti da moment motora (Torque actual value, Smoothed with p0045 - m_m) “dobro” prati zadatu vrednost. Promena vrednosti momenta motora u podešenom opsegu za posledicu ima promenu brzine obrtanja motora (Speed actual value, Smoothed with p0045 - n_m). Sa slike 4.36 može da se proceni srednja vrednost brzine obrtanja motora na oko -400 $^{\circ}/\text{min}$, što je u skladu sa odgovarajućom proračunskom vrednošću iz tabele 4.6, -399.6243 $^{\circ}/\text{min}$.

Na slici 4.37 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla, a za brzine kretanja kрана $0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i $0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

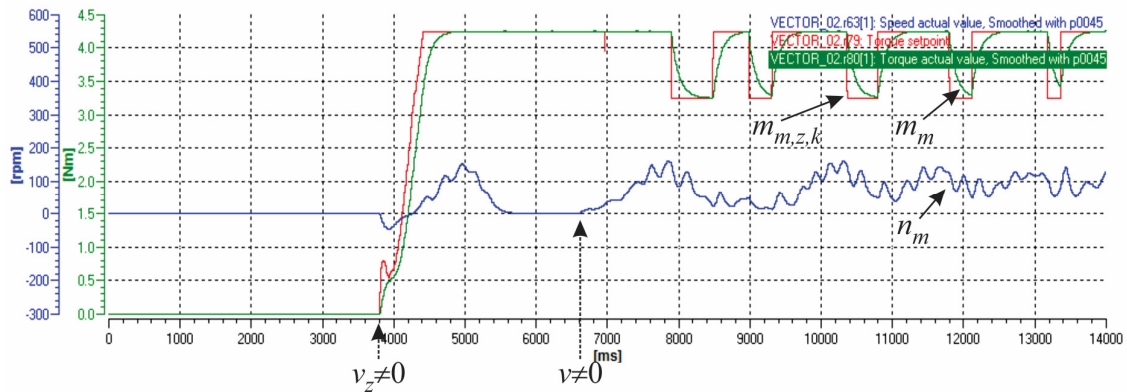


Slika 4.37. Vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri odmotavanju kabla,

$$v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ i } 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Analizom slike 4.37 može se zaključiti da je vremenska zavisnost zadatog momenta motora (Torque setpoint - $m_{m,z,k}$) u skladu sa prethodnim razmatranjem. Takođe, može se zaključiti da moment motora (Torque actual value, Smoothed with p0045 - m_m) “dobro” prati zadatu vrednost. Promena vrednosti momenta motora u podešenom opsegu za posledicu ima promenu brzine obrtanja motora (Speed actual value, Smoothed with p0045 - n_m). Sa slike 4.37 mogu da se procene srednje vrednosti brzine obrtanja motora na oko $-100 \text{ }^\circ/\text{min}$, $-200 \text{ }^\circ/\text{min}$, $-300 \text{ }^\circ/\text{min}$ i $-400 \text{ }^\circ/\text{min}$, što je u skladu sa odgovarajućim proračunskim vrednostima iz tabele 4.6, $-95.9098 \text{ }^\circ/\text{min}$, $-191.8197 \text{ }^\circ/\text{min}$, $-287.7295 \text{ }^\circ/\text{min}$ i $-399.6243 \text{ }^\circ/\text{min}$ respektivno.

Na slici 4.38 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri namotavanju kabla, a za minimalnu brzinu kretanja kрана, $v_{\min} = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Slika 4.38. Vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri namotavanju kabla, $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

U trenutku $t \approx 3.8$ s upravljački uređaj za pogon kretanja kрана (palica rukovaoca za pogon kretanja) prebačen je iz nultog položaja u položaj koji odgovara zadatom smeru kretanja kрана desno u odnosu na kabinu dizaličara i zadatoj brzini kretanja kрана $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Primenom vretenastog bregastog prekidača 9S1, detektovan je položaj kрана u sektoru kranske staze S2.

U cilju određivanja položaja kрана u odnosu na priključno mesto, pre pokretanja kрана vrši se zatezanje (namotavanje) kabla sa vrednostima za zadati moment motora koje odgovaraju detektovanom sektoru kranske staze. Imajući u vidu da je položaj kрана u sektoru kranske staze S2, zadata konstantna vrednost momenta motora od 3.6 Nm koriguje se kompenzatorom poremećaja na osnovu stanja induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja 9S10 i 9S11, a zatim se limitira u podešenom opsegu (3.25 Nm ÷ 4.25 Nm). Dobijena kompenzovana vrednost zadatog momenta motora, $m_{m,z,k}$, prosleđuje se regulatoru momenta i predstavlja zadati moment motora (Torque setpoint). S obzirom da se kran ne kreće, zadati moment motora pri zatezanju kabla uvek dostiže maksimalnu vrednost. U trenutku $t \approx 5.6$ s marker klatna uvođnika kablububnja aktivira induktivni davač 9S5, detektovan je položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto i zatezanje kabla se završava, a pogonu kretanja se daje dozvola za rad.

U skladu sa položajem upravljačkog uređaja, kran počinje sa kretanjem u smeru desno ($v \neq 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), a sa zadatom brzinom kretanja $v_z = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($t \approx 6.6$ s). S obzirom da je zadati smer kretanja kрана desno u odnosu na kabinu dizaličara i da je položaj kрана levo u odnosu na priključno mesto, ima se namotavanje kabla sa vrednostima za zadati moment motora koje odgovaraju detektovanom sektoru kranske staze. Imajući u vidu da je položaj kрана u sektoru kranske staze S2, zadata

konstantna vrednost momenta motora od 3.6 Nm koriguje se kompenzatorom poremećaja na osnovu stanja induktivnih davača za kompenzaciju poremećaja 9S10 i 9S11, a zatim se limitira u podešenom opsegu (3.25 Nm ÷ 4.25 Nm). Dobijena kompenzovana vrednost zadatog momenta motora, $m_{m,z,k}$, prosleđuje se regulatoru momenta i predstavlja zadati moment motora (Torque setpoint).

Analizom slike 4.38 može se zaključiti da je vremenska zavisnost zadatog momenta motora (Torque setpoint - $m_{m,z,k}$) u skladu sa prethodnim razmatranjem. Takođe, može se zaključiti da moment motora (Torque actual value, Smoothed with p0045 - m_m) “dobro” prati zadatu vrednost. Promena vrednosti momenta motora u podešenom opsegu za posledicu ima promenu brzine obrtanja motora (Speed actual value, Smoothed with p0045 - n_m). Sa slike 4.38 može da se proceni srednja vrednost brzine obrtanja motora na oko $100 \text{ }^\circ/\text{min}$, što je u skladu sa odgovarajućom proračunskom vrednošću iz tabele 4.6, $95.9098 \text{ }^\circ/\text{min}$.

Na osnovu prethodne analize slika 4.35 do 4.38 nameće se zaključak da, u svim slučajevima, vremenska zavisnost zadatog momenta motora odgovara zadatatoj konstantnoj vrednosti momenta motora, korigovanoj kompenzatorom poremećaja i limitiranoj unutar podešenog opsega. Kao posledica brzog kompenzatora poremećaja, vremenska zavisnost zadatog momenta motora menja se unutar podešenog opsega limitera, dostižući maksimalnu i minimalnu vrednost. Takođe, može se zaključiti da moment motora u svim slučajevima “dobro” prati zadatu vrednost. Promena vrednosti momenta motora u podešenom opsegu, koji odgovara proračunskim vrednostima iz tabele 4.5, za posledicu ima promenu brzine obrtanja motora. Srednje vrednosti brzine obrtanja motora odgovaraju proračunskim vrednostima iz tabele 4.6.

Posledica promene vrednosti momenta motora u podešenom opsegu, odnosno promene brzine obrtanja motora, je promena položaja pokretne ruke uvodnika kabl-bubnja, a samim tim i promena sile zatezanja kabla. Adekvatnim eksperimentalnim podešenjem limitera kompenzovane vrednosti zadatog momenta motora, obezbeđena je mala promena položaja pokretne ruke uvodnika, odnosno promena sile zatezanja kabla u uskim granicama oko zadate vrednosti.

Imajući u vidu napred navedeno, nameće se zaključak da modifikovani algoritam upravljanja pogonom kabl-bubnja na Derik kranu DK004, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 4.25, ima zadovoljavajuće performanse.

5. Zaključak

Konkretizacija i praktična realizacija naučnog istraživanja uvek predstavljaju dodatni izazov, posebno kada su u pitanju industrijski uređaji i objekti kod kojih su bezbednost i funkcionalnost na prvom mestu. Ova doktorska disertacija pravi korak u tom pravcu kroz uvođenje novih, inovativnih rešenja za upravljanje elektromotornim pogonima kranova. Disertacija daje jedan sistematičan pristup pri projektovanju, testiranju i verifikaciji upravljačkih sistema kranova, koji na kraju dovodi do značajnog poboljšanja performansi i povećanja pouzdanosti kompletnog postrojenja.

U disertaciji je, u skladu sa postavljenim opštim ciljem naučnog istraživanja, izložena klasifikacija elektromotornih pogona kranova prema nameni istih, sa posebnim osvrtom na prirodu mehaničke sprege između motora višemotornih pogona. Na osnovu dostupne naučne i stručne literature, a posebno na osnovu dugogodišnjeg inženjerskog iskustva iz ove oblasti, utvrđeni su očekivani praktični problemi. Shodno usvojenom upravljačkom konceptu kranova na bazi standardnih industrijskih programabilnih logičkih kontrolera i komunikacionih mreža, predloženi su adekvatni algoritmi za poboljšanje postojećih rešenja, ali su i konkretizovani pojedini istraživački algoritmi kao originalni doprinosi ove disertacije. Poseban izazov bila je implementacija složenih algoritama kao nadogradnja postojećih upravljačkih sistema, imajući u vidu ograničene proračunske resurse PLC-a i zahteve za obezbeđenjem pouzdanosti.

Za regulisane višemotorne pogone sa velikim rasponom, a kod kranova su to pogon kretanja portala i ponekad pogon kretanja mosta, predložen je jednostavan i praktičan način eliminacije zakošenja sa aktivnom korekcijom pređenog puta. Ovaj inovativni algoritam za regulaciju zakošenja pogodan je za implementaciju u postojećim, regulisanim elektromotornim pogonima. Pri praktičnoj realizaciji koriste se standardni programabilni logički kontroleri, apsolutni enkoderski davači pozicije i industrijska komunikaciona mreža za razmenu podataka. Nezaobilazan zahtev prilikom formiranja ovakvog upravljačkog algoritma predstavlja očuvanje bezbednosti i funkcionalnosti u specifičnim situacijama, kao što su na primer: otkaz ključnih komponenti, pojave habanja, proklizavanje jedne strane u odnosu na drugu, neravnomerno opterećenje pojedinih strana zbog položaja tereta, uticaj vetra kod pogona na otvorenom. Iz tog razloga, formiran je kompenzator spoljašnjih poremećaja kao posebna struktura u upravljačkom algoritmu, koji, na bazi dodatnog sistema markera, koriguje potencijalno pogrešan proračun zakošenja i omogućava pouzdan rad algoritma za regulaciju zakošenja. U disertaciji je prikazana struktura algoritma za regulaciju zakošenja sa pripadajućim kompenzatorom spoljašnjih poremećaja, izloženo je projektovanje regulatora zakošenja i dati su karakteristični delovi programskog koda. Sprovedena detaljna analiza performansi potvrdila je dobre regulacione

karakteristike. Predloženo rešenje primenjeno je u upravljačkoj strukturi pogona kretanja portala dva krana različitih raspona, dužina kranske staze i brzina kretanja.

Za mehanički kruto spregnute motore regulisanih višemotornih pogona kretanja portala, mosta i kolica, predložen je i implementiran efikasan algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja između pripadajućih motora. I u ovom slučaju korišćen je standardni PLC, u kojem je realizovan regulator raspodele opterećenja, kao i industrijska komunikaciona mreža za razmenu podataka. Predloženo rešenje primenjeno je u upravljačkim strukturama napred navedenih pogona industrijskih kranova, a performanse su dokazane pri eksploatacionim uslovima serijom testova i komparativnom analizom dobijenih rezultata. U disertaciji je detaljno objašnjena metoda za podešavanje parametara regulatora raspodele opterećenja i dati su karakteristični delovi programskog koda.

Detaljana matematička i simulaciona analiza pogona monospiralnog kabl-bubnja dovela je do predloga nove metode za izbor pogonskog motora. Zbog značajne varijacije momenta inercije kabl-bubnja i složene regulacije brzine obrtanja, na koju uticaj imaju dužina namotanog kabla, ali i brzina kretanja portala, kompletan analitički model morao je da bude pojednostavljen u cilju formiranja primenljivih inženjerskih smernica za projektovanje. Verifikacija uvedenih uprošćenja realizovana je korišćenjem simulacionog modela, a zatim je za konkretan primer izvršen izbor pogonskog motora monospiralnog kabl-bubnja. Takođe, u disertaciji je, nakon detaljne analize mehaničke konstrukcije i analize rada, predložen novi algoritam upravljanja pogonom monospiralnog kabl-bubnja. Radne performanse ilustrovane su snimcima karakterističnih veličina u različitim režimima rada.

U cilju povećanja elektroenergetske efikasnosti kranova i povećanja imunosti na narušen kvalitet napajanja, predložen je koncept napajanja elektromotornih pogona kranova koji se bazira na zajedničkom jednosmernom kolu i aktivnom mrežnom ispravljanju sa oblikovanjem ulaznih struja. Optimizacija kompletnog postrojenja realizovana je tako što je poznato industrijsko rešenje inovirano specifičnim načinom regulacije elektromotornih pogona kрана, sa osnovnom idejom da se vraćanje energije u mrežu svede na minimum. Rekuperacija energije na nivou celog kрана dešava se samo pri generatorskom režimu rada motora pogona dizanja ili pogona promene dohvata, i to pri spuštanju tereta samo iznad određenog opterećenja motora. U ostalim slučajevima, generisana energija koristi se interno, za napajanje potrošača vezanih na zajedničko jednosmerno kolo, čime se smanjuju gubici. Predloženi koncept napajanja elektromotornih pogona kranova praktično je realizovan i testiran kod jednog industrijskog kрана.

U disertaciji je prezentovano i jedno praktično rešenje za tandemski rad kranova, koje se zasniva na primeni koncepta rekonfigurabilne komunikacione mreže. Zahtev za tandemskim radom kranova javlja se u industriji kada postoji potreba za podizanjem tereta, čija je masa veća od deklarisanе nosivosti pojedinačnih kranova. Takođe, ovaj zahtev može da se javi i kada postoji potreba za podizanjem geometrijski izrazito nesimetričnih tereta ili tereta velikih dimenzija, što je čest slučaj pri montaži rudarske opreme. Jedan od načina za tandemski rad kranova jeste prisustvo rukovaoca na svakom kranu, sa zadatkom da koordinisano rade pri manipulacijama. U ovoj disertaciji izloženo je drugačije rešenje, koje podrazumeva povezivanju kranova na upravljačkom nivou, što omogućava upravljanje tandemskim radom kranova od strane samo jednog rukovaoca. Time je postignuta ušteda u angažovanom osoblju, eliminisana mogućnost nekoordinisanog rada i smanjena verovatnoća pogrešnih manipulacija. Predloženo rešenje praktično je primenjeno pri realizaciji tandemskog rada dva pokretna kрана.

Imajući u vidu napred navedeno, za naučne doprinose ove doktorske disertacije mogu da se izdvoje sledeći rezultati:

1. novi algoritam za regulaciju zakošenja;
2. unapređen algoritam za ravnomernu raspodelu opterećenja;
3. za pogon monospiralnog kabl-bubnja:
 - a) nova metoda za izbor pogonskog motora;
 - b) novi algoritam upravljanja;
4. inovacija poznatog industrijskog rešenja za realizaciju generatorskog režima rada motora na bazi aktivnog mrežnog ispravljača;
5. unapređeno rešenje za tandemski rad kranova.

Literatura

- [1] Borislav Jeftenić, Milan Bebić, Saša Štatkić, “*Višemotorni električni pogoni*”, Akademska misao, Beograd, ISBN 978-86-7466-402-5, 2011.
- [2] Borislav Jeftenić, Milan Bebić, Saša Štatkić, “*Controlled multi-motor drives*”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006, 23-26 May 2006, Taormina, Italy, ISBN: 1-4244-0193-3 (Print), pp. 1392-1398.
DOI: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649985
- [3] Borislav I. Jeftenić, “*Višemotorni regulisani pogoni*”, 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS - Ee 2001, NOVI SAD, YUGOSLAVIA, October 31 - November 2, 2001, pp. 11-18.
- [4] Francisco J. Perez-Pinal, Ciro Nunez, Ricardo Alvarez, Ilse Cervantes, “*Comparison of multi-motor synchronization techniques*”, The 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2004, 2-6 November 2004, Busan, Korea (South), Vol. 2, pp. 1670-1675. doi: 10.1109/IECON.2004.1431832
- [5] A. K. Paul, I. Banerjee, B. K. Snatra, N. Neogi, “*Application of AC motors and drives in Steel Industries*”, Fifteenth National Power System Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008, pp. 159-163.
- [6] Saša Štatkić, Neša Rašić, Borislav Jeftenić, “*Višemotorni regulisani pogoni na transportima rudarskih mašina*”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS - Ee 2005, NOVI SAD, SERBIA & MONTENEGRO, November 2nd-4th, 2005, Paper No. T2-2.5, pp. 1-4.
- [7] N. N. Mitrović, M. P. Petronijević, V. Z. Kostić, “*Praktična implementacija višemotornih pogona na pretovarnom mostu u Fabrici šećera TE-TO Senta*”, 30. naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem HIPNEF 2006, Vrnjačka Banja, 24.-26. maj 2006, Zbornik radova, pp. 229-234.
- [8] Vojkan Kostić, Nebojša Mitrović, Bojan Banković, Filip Filipović, Milutin Petronijević, “*Optimal Design and Control of Multi-Motor Drive System for Industrial Application*”, The Journal Tehnički vjesnik – Technical Gazette (TV-TG), December 2020, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online), Vol. 27, No. 6, pp. 1815-1824.
doi: <https://doi.org/10.17559/TV-20180509152814>

- [9] Nebojsa Mitrovic, Milutin Petronijevic, Vojkan Kostic and Borislav Jeftenic, “*Electrical Drives for Crane Application*”, InTech, Mechanical Engineering, Murat Gokcek (Ed.), April 2012, ISBN: 978-953-51-0505-3, pp. 131-156. DOI: 10.5772/35560
- [10] J. Verschoof, “*Cranes - Design, Practice and Maintenance*”, 2nd Edition, Professional Engineering Publishing Limited, London, UK, ISBN 1 86058 373 3, 2002.
- [11] Keum-Shik Hong, Umer Hameed Shah, “*Dynamics and Control of Industrial Cranes*”, Advances in Industrial Control, Springer, ISSN 1430-9491, 2019.
- [12] dr Radić Mijajlović, dr Zoran Marinković, dr Miomir Jovanović, “*Dizalice - osnove*”, Gradina, Niš, ISBN 86-7129-124-3, 1994.
- [13] “*Pravilnik o tehničkim normativima za dizalice*”, Sl. list SFRJ, br. 65/91.
- [14] Nebojsa Mitrovic, Vojkan Kostic, Milutin Petronijevic, Borislav Jeftenic, “*Multi-Motor Drives for Crane Application*”, Advances in Electrical and Computer Engineering, 2009, ISSN 1582-7445, e-ISSN 1844-7600, Volume 9, Number 3, pp. 57-62.
doi: 10.4316/AECE.2009.03011
- [15] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira and D. Both, “*Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems*”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 1, Jan.-Feb. 2005, pp. 188-199.
doi: 10.1109/TIA.2004.841022
- [16] R. Saidur, S. Mekhilef, M. B. Ali, A. Safari, H. A. Mohammed, “*Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Volume 16, Issue 1, January 2012, pp. 543-550.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020>
- [17] P. Waide, C. U. Brunner, “*Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*”, International Energy Agency, OECD/IEA, 2011.
- [18] F. Busschots, R. Belmans, W. Geysen, “*Application of field oriented control in crane drives*”, Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 28 September - 4 October 1991, Dearborn, Michigan, USA, ISBN: 0-7803-0453-5 (Print), Vol. 1, pp. 347-353. doi: 10.1109/IAS.1991.178178
- [19] Steve Petersen, “*Common Bus and Line Regeneration - Addressing VFD Applications when Regenerative Energy is Present*”, Yaskawa America, 2015.
- [20] J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt and P. Lezana, “*PWM regenerative rectifiers: state of the art*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 1, February 2005, pp. 5-22. doi: 10.1109/TIE.2004.841149

- [21] R. Hoppler, U. Maier, D. Ryf and L. Blahous, “*Use of multidrives with active front-end technology in the cement and minerals industries*”, ABB Review, A Team of Drives, 2009, pp. 71-76.
- [22] Jose Rodriguez, Luis Moran, Jorge Pontt, Jose Espinoza, Rodrigo Diaz and Eduardo Silva, “*Operating Experience of Shovel Drives for Mining Applications*”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 2, March/April 2004, pp. 664-671.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2004.824508>
- [23] L. Moran, J. Espinoza, M. Ortiz, J. Rodriguez and J. Dixon, “*Practical Problems Associated with the Operation of ASDs based on Active Front End Converters in Power Distribution Systems*”, IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, Seattle, WA, USA, vol. 4, 03-07 October 2004, pp. 2568-2572.
<https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348837>
- [24] M. Ben Said-Romdhane, M. W. Naouar, I. Slama Belkhodja, E. Monmasson, “*Simple and systematic LCL filter design for three-phase grid-connected power converters*”, Mathematics and Computers in Simulation, vol. 130, December 2016, pp. 181-193.
<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.09.011>
- [25] Marco Liserre, Frede Blaabjerg and Steffan Hansen, “*Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier*”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, September/October 2005, pp. 1281-1291. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>
- [26] J. Muhlethaler, M. Schweizer, R. Blattmann, J. W. Kolar, A. Ecklebe, “*Optimal Design of LCL Harmonic Filters for Three-Phase PFC Rectifiers*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 28, Issue 7, July 2013, pp. 3114-3125.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2225641>
- [27] Marwa Ben Said-Romdhane, Mohamed Wissem Naouar, Ilhem Slama Belkhodja and Eric Monmasson, “*An Improved LCL Filter Design in Order to Ensure Stability without Damping and Despite Large Grid Impedance Variations*”, Energies, Volume 10, Issue 3, 336, March 2017. <https://doi.org/10.3390/en10030336>
- [28] A. K. Sahoo, A. Shahani, K. Basu, N. Mohan, “*LCL Filter Design for Grid-Connected Inverters by Analytical Estimation of PWM Ripple Voltage*”, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA, 16-20 March 2014, pp. 1281-1286. <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803471>
- [29] G. Ye, M. Babar, J. F. G. Cobben, “*Performance Comparison of Different Filter Applications in Three-Phase PFC Rectifier*”, 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Krakow, Poland, 10-12 May 2014, pp. 437-442.
<https://doi.org/10.1109/EEEIC.2014.6835909>

- [30] Borislav Jeftenić, Dragan Jevtić, “*Novi elektromotorni pogoni na mostnim dizalicama u HE Derdap I*”, Zbornik radova 50. Konferencije za ETRAN, ETRAN 2006, Beograd, 6.-8. jun 2006, tom I, pp. 372-375.
- [31] Jaishankar Iyer, “*Load sharing schemes in multiple induction motor drive applications using volts per hertz control*”, master thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, December 2011.
- [32] B. Jeftenić, M. Bebić, D. Jevtić, “*Raspodela opterećenja kod pogona u mehaničkoj sprezi*”, 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS - Ee 2001, NOVI SAD, YUGOSLAVIA, October 31 - November 2, 2001, pp. 197-201.
- [33] Siemens, “*SINAMICS G: Load sharing for two coupled drives*”, Entry-ID: 109774232, V1.1, 06/2020.
- [34] Rockwell Automation, “*Load Sharing Applications for AC Drives*”, Publication DRIVES-WP001A-EN-P, June 2000.
- [35] Rockwell Automation, “*Load Sharing for the 1336 PLUS II AC Drive*”, Publication 1336F-WP001A-EN-P, June 2000.
- [36] Nebojša Mitrović, Vojkan Kostić, Milutin Petronijević, Borislav Jeftenić, “*Practical Implementation of Load Sharing and Anti Skew Controllers for Wide Span Gantry Crane Drives*”, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, ISSN 0039-2480, UDC 621.875.5, Volume 56, Number 3, 2010, pp. 207-216.
- [37] Mr Vojkan Kostić, Mr Milutin Petronijević, Dr Nebojša Mitrović, “*Regulacija zakošenja i raspodele opterećenja u regulisanim višemotornim pogonima sa velikim rasponom*”. Kategorija tehničkog rešenja: (M83) “Novo laboratorijsko postrojenje, novo eksperimentalno postrojenje, novi tehnološki postupak”. Primena od 2010. Korisnik: Elektronski fakultet u Nišu, KOPEX MIN Fitip.
- [38] G.E. Smid, J.B. Klaassens, H.R. van Nauta Lemke, A. El Azzouzi, R. van der Wekken, “*Automatic Skew Control on Container Transshipment Cranes*”, IFAC Proceedings Volumes, Elsevier, 2000, ISSN 1474-6670, Volume 33, Issue 26, pp. 977-982.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)39272-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)39272-8)
- [39] Quang Hieu Ngo, Keum-Shik Hong, Kyeong Han Kim, Yong Jeong Shin and Sang-Hei Choi, “*Skew Control of a Container Crane*”, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea (South), 2008, pp. 1490-1494.
doi: 10.1109/ICCAS.2008.4694378
- [40] N. Mitrovic, V. Kostic, M. Petronijevic and B. Jeftenic, “*Practical Implementation of Multi-Motor Drives for Wide Span Gantry Cranes*”, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, 2010, ISSN 1028-6284, Volume 34, Number B6, pp. 649-654.

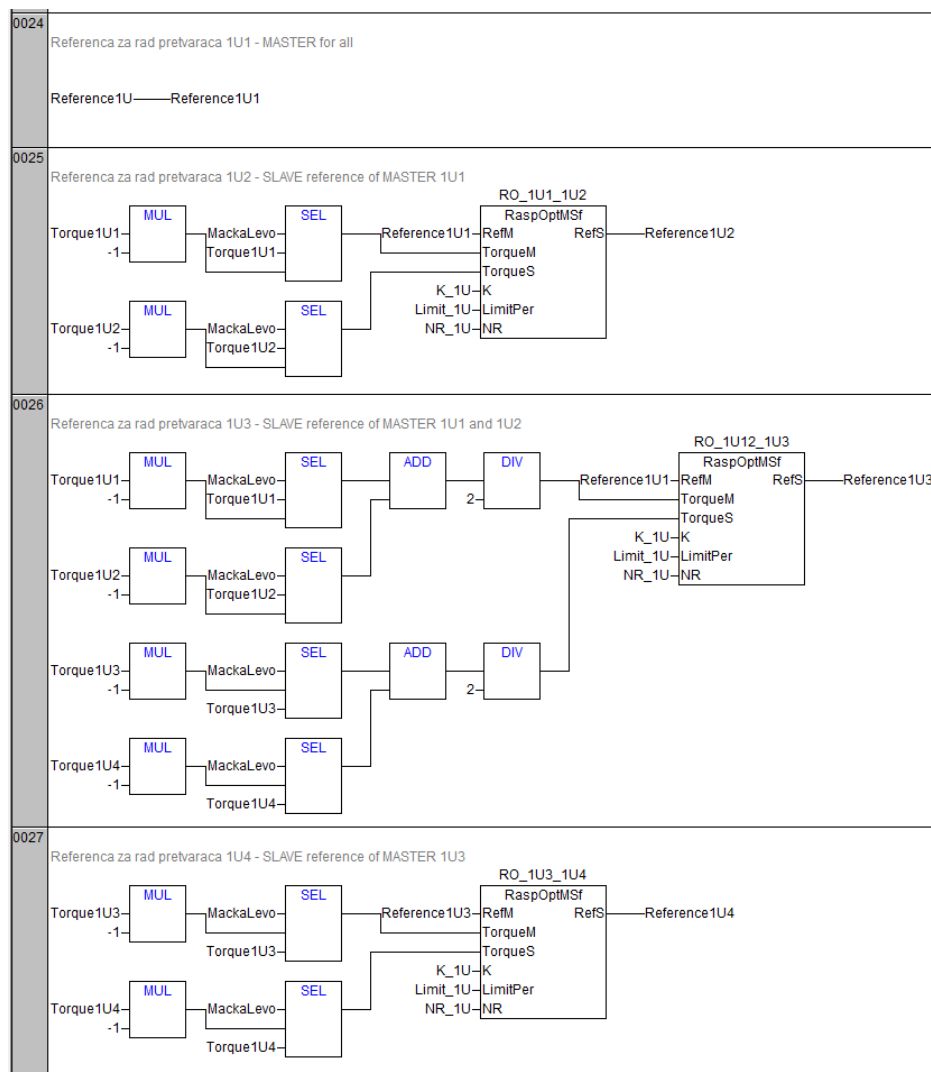
- [41] Nebojša Mitrović, Vojkan Kostić, Milutin Petronijević, Borislav Jeftenić, Bojan Banković, “*Skew Controller for Rail Mounted Wide Span Gantry Cranes*”, 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS - Ee 2009, NOVI SAD, REPUBLIC OF SERBIA, October 28th - 30th, 2009, ISBN 978-86-7892-208-4, Paper No. T2-1.3, pp. 1-4.
- [42] Vojkan Kostić, Nebojša Mitrović, Milutin Petronijević, Borislav Jeftenić, “*Rešenje eliminacije i korekcije zakošenja pretovarnog mosta u šećerani “TE-TO“ Senta*”, 30. naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem HIPNEF 2006, Vrnjačka Banja, 24.-26. maj 2006, Zbornik radova, pp. 195-200.
- [43] Nebojša Mitrović, Milutin Petronijević, Vojkan Kostić, Borislav Jeftenić, “*Tehničko rešenje za eliminaciju i korekciju zakošenja pretovarnog mosta*”. Kategorija tehničkog rešenja: (M82) “Industrijski prototip”. Primena od 5.10.2005. Korisnik: TE-TO Senta, LBFC Beočinska fabrika cementa.
- [44] Hanafi Subari, Shin-Horng Chong, Wai-Keat Hee, Wen-Yee Chong, M. Riduwan Nawawi, Md Nazri Othman, “*Investigation of Model Parameter Variation for Tension Control of a Multi Motor Wire Winding System*”, Proceedings of the 10th Asian Control Conference, ASCC 2015, Kota Kinabalu, 31st May – 3rd June 2015, pp. 1704-1709.
- [45] STEMMANN-TECHNIK GMBH, “*Motor-driven Cable Reels*”.
- [46] Siemens, “*SIMOREG DC Master – Application, Center Winder*”, Edition 05 12.02.
- [47] William B. Gilbert, “*Methods of Diameter Determination for Center Driven Unwinds & Rewinds*”, Siemens.
- [48] Denis Morozov, “*Optimizing Tension Control in Center-Driven Winders*”, Siemens.
- [49] Siemens, “*SIMOVERT MASTERDRIVES - Application Manual*”, Edition 09.99.
- [50] Vojkan Kostić, Nebojša Mitrović, Bojan Banković, Milutin Petronijević, “*The Monospiral Motorised Cable Reel in Crane Applications*”, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, June 2017, ISSN: 0354-2025 (Print), ISSN: 2335-0164 (Online), COBISS.SR-ID 98732551, ZDB-ID: 2766459-4, UDC 621.3/.8, pp. 315-330. DOI: 10.22190/FUME170508015K
- [51] V. Z. Kostić, N. N Mitrović, B. G. Banković, “*The Monospiral Motorised Cable Reel in Crane Applications*”, XIII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2016, 09-11 November 2016, Niš, Serbia, Proceedings of Papers, ISBN 978-86-6125-170-2, pp. 112-115.
- [52] Siemens, “*SINAMICS S120 - Chassis power units*”, Manual 01/2012.
- [53] Siemens, “*SINAMICS - Low Voltage Engineering Manual*”, June 2020.

Prilozi

Prilog 1

U ovom prilogu dat je deo PLC programa sa pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, kojim se realizuje raspodela opterećenja u pogonu kretanja kolica. PLC program formiran je korišćenjem softvera “907 AC 1131”, proizvođača ABB.

Programske linije 24 do 27, prikazane na slici P1.1, realizuju raspodelu opterećenja u pogonu kretanja kolica između četiri mehanički spregnuta asinhrona motora (1M1 do 1M4) koji se napajaju iz frekvencijskih pretvarača (1U1 do 1U4). Navedene programske linije odgovaraju principijelnoj blok šemi, prikazanoj na slici 3.16.



Slika P1.1. Programske linije za realizaciju raspodele opterećenja – pogon kretanja kolica

U programskoj liniji 24, a u skladu sa analizom iz poglavlja 3.3, frekvencijskom pretvaraču 1U1 prosleđuje se zadata vrednost brzine obrtanja pogona (“Reference1U”). Za frekvencijske pretvarače 1U2 i 1U3, zadata vrednost brzine obrtanja pogona koriguje se regulatorima raspodele opterećenja u programskim linijama 25 i 26 (“RO_1U1_1U2” i “RO_1U12_1U3”). Za frekvencijski pretvarač 1U4, zadata vrednost brzine obrtanja frekvencijskog pretvarača 1U3 koriguje se regulatorom raspodele opterećenja u programskoj liniji 27 (“RO_1U3_1U4”).

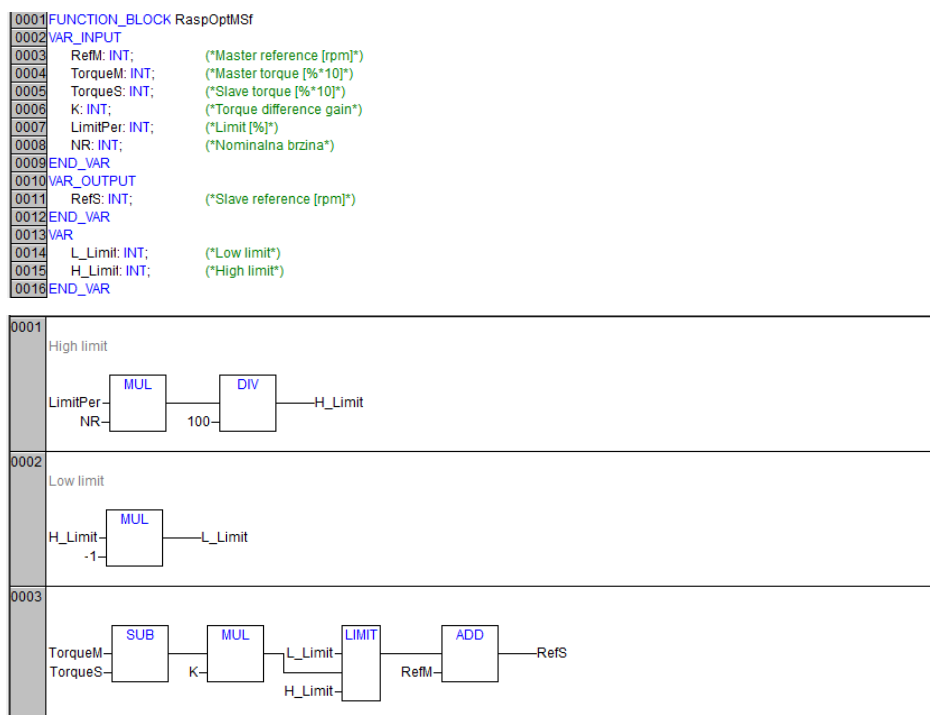
Na slici P1.2 data su PLC podešenja za pogon kretanja kolica (pogon mačke). Može se zaključiti da, u skladu sa analizom iz poglavlja 3.3, proporcionalno pojačanje svih regulatora raspodele opterećenja iznosi 1 r.j. (“K_1U”), kao i da su limiteri podešeni na vrednost od 2 % (“Limit_1U”).

0048	(*PogonMacke*)		
0049	MackaRef1:	INT :=150;	(*Macka I brzina*)
0050	MackaRef2:	INT :=300;	(*Macka II brzina*)
0051	MackaRef3:	INT :=600;	(*Macka III brzina*)
0052	MackaRef4:	INT :=900;	(*Macka IV brzina*)
0053	MackaRefAu:	INT :=900;	(*Macka brzina u automatskom radu*)
0054	ZERO_RUN_1U:	TIME :=T#5s;	(*Vreme rada na nultoj brzini*)
0055	NR_1U:	INT :=950;	(*Nominalna brzina 1U*)
0056	K_1U:	INT :=1;	(*Torque difference gain 1U - RO*)
0057	Limit_1U:	INT :=2;	(*Limit 1U [%] - RO*)

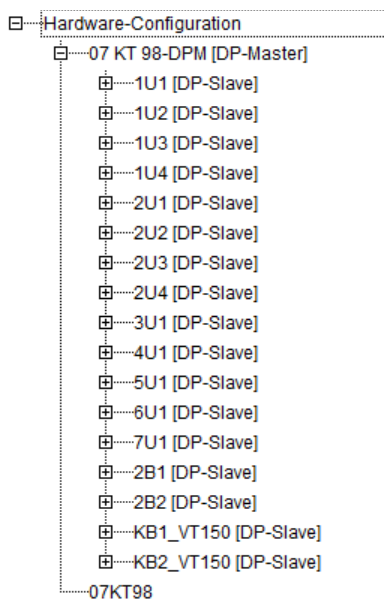
Slika P1.2. Podešenja za pogon kretanja kolica (pogon mačke)

PLC funkcijski blok samog regulatora raspodele opterećenja (“RaspOptMSF”), koji se izvršava u programskim linijama 25 do 27 sa slike P1.1, prikazan je na slici P1.3. Navedeni funkcijski blok odgovara principijelnoj blok šemi, prikazanoj na slici 3.1. U skladu sa analizom iz poglavlja 3.1, vrednost korekcije brzine, koju unosi regulator raspodele opterećenja, srazmerna je algebarskoj razlici momenata motora i limitirana je unutar podešenog opsega (programska linija 3). U programskoj liniji 1, procentulano podešenje limitera svodi se na apsolutnu vrednost u odnosu na nominalnu brzinu motora, a kao gornja granična vrednost. Donja granična vrednost računa se u programskoj liniji 2.

Razmena podataka između PLC-a i frekvencijskih pretvarača 1U1 do 1U4 realizovana je industrijskom komunikacionom mrežom PROFIBUS DP. Na slici P1.4 data je topologija komunikacione mreže pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, formirana korišćenjem softvera “907 AC 1131”. PLC je glavni čvor (“DP-Master”), dok su frekvencijski pretvarači 1U1 do 1U4 podređeni čvorovi (“DP-Slave”).

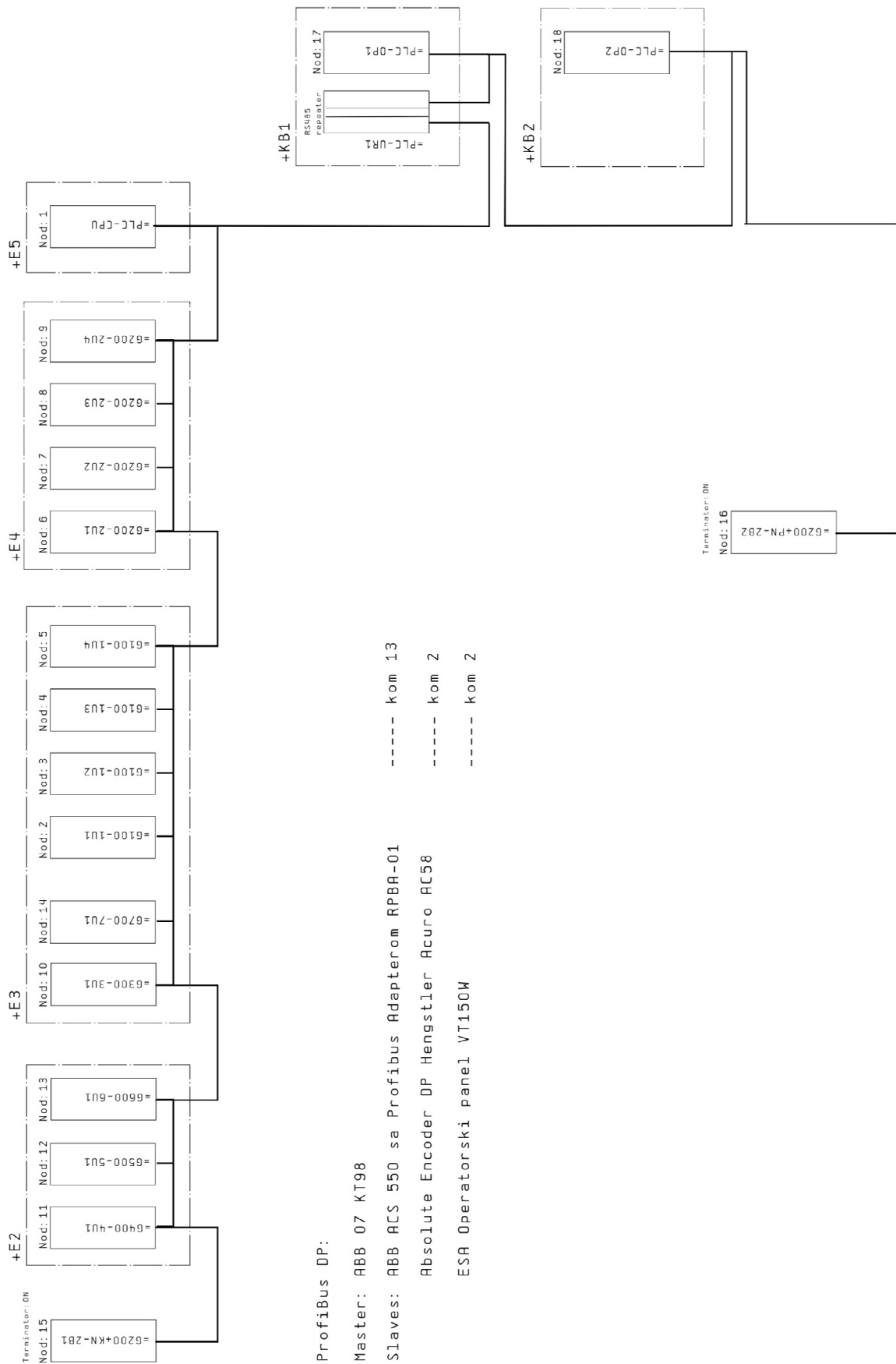


Slika P1.3. Funkcijski blok regulatora raspodele opterećenja



Slika P1.4. Topologija PROFIBUS DP komunikacione mreže pretovarnog mosta

Deo tehničke dokumentacije, koji se odnosi na PROFIBUS DP komunikacionu mrežu pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, prikazan je na slici P1.5. Na datoj slici, PLC je obeležen sa “Nod:1”, a frekvencijski pretvarači 1U1 do 1U4 sa “Nod:2” do “Nod:5”, respektivno.

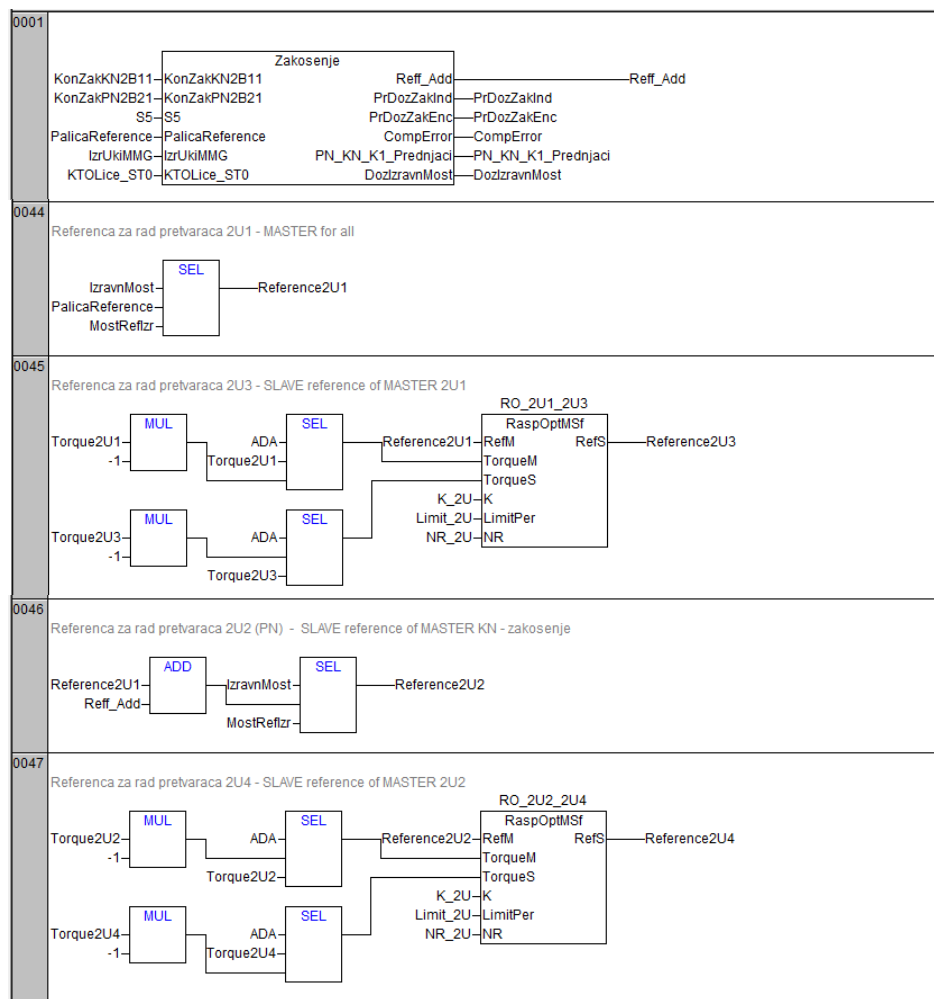


Slika P1.5. PROFIBUS DP komunikaciona mreža pretovarnog mosta

Prilog 2

U ovom prilogu dat je deo PLC programa sa pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, kojim se reguliše zakošenje i realizuje raspodela opterećenja u pogonu kretanja mosta. PLC program formiran je korišćenjem softvera “907 AC 1131”, proizvođača ABB.

Programske linije 1 i 44 do 47, prikazane na slici P2.1, regulišu zakošenje i realizuju raspodelu opterećenja u pogonu kretanja mosta, za čije se pokretanje koriste četiri asinhrona motora (2M1 do 2M4) koji se napajaju iz frekvencijskih pretvarača (2U1 do 2U4). Navedene programske linije odgovaraju principijelnoj blok šemi, prikazanoj na slici 3.18.



Slika P2.1. Programske linije za regulaciju zakošenja i realizaciju raspodele opterećenja – pogon kretanja mosta

U programskoj liniji 44, a u skladu sa analizom iz poglavlja 3.3, frekvencijskom pretvaraču 2U1 prosleđuje se zadana vrednost brzine obrtanja pogona (“Reference2U1”). Za frekvencijski pretvarač 2U2, zadana vrednost brzine obrtanja pogona koriguje se regulatorom zakošenja u programskoj liniji 46, pri čemu se vrednost korekcije “Reff_Add” računa u programskoj liniji 1 (“Zakosenje”). Za frekvencijski pretvarač 2U3, zadana vrednost brzine obrtanja pogona koriguje se regulatorom raspodele opterećenja u programskoj liniji 45 (“RO_2U1_2U3”). Za frekvencijski pretvarač 2U4, zadana vrednost brzine obrtanja frekvencijskog pretvarača 2U2 koriguje se regulatorom raspodele opterećenja u programskoj liniji 47 (“RO_2U2_2U4”).

Na slici P2.2 data su PLC podešenja za pogon kretanja mosta. Može se zaključiti da, u skladu sa analizom iz poglavlja 3.3, proporcionalno pojačanje regulatora zakošenja iznosi $\frac{1}{236230}$ (“K_Z_1”), kao i da je limiter podešen na vrednost od 10 % (“Limit_2U_Z”). Takođe, proporcionalno pojačanje oba regulatora raspodele opterećenja iznosi 1 r.j. (“K_2U”), a njihovi limiteri podešeni su na vrednost od 2 % (“Limit_2U”).

0067	(*PogonMosta*)		
0068	MostRef1:	INT :=500;	(*Most I brzina*)
0069	MostRef2:	INT :=750;	(*Most II brzina*)
0070	MostRef3:	INT :=1000;	(*Most III brzina*)
0071	MostRef4:	INT :=1350;	(*Most IV brzina*)
0072	MostRefIzr:	INT :=500;	(*Most brzina pri izravnavanju*)
0073	ZERO_RUN_2U:	TIME :=T#5s;	(*Vreme rada na nultoj brzini*)
0074	NR_2U:	INT :=1455;	(*Nominalna referenca 2U*)
0075	K_2U:	INT :=1;	(*Torque difference gain 2U - RO*)
0076	Limit_2U:	INT :=2;	(*Limit 2U (%) - RO*)
0077	offEncKN_H:	UINT:=0;	(*Offset of high value KN encoder*)
0078	offEncKN_L:	UINT:=0;	(*Offset of low value KN encoder*)
0079	offEncPN_H:	UINT:=0;	(*Offset of high value PN encoder*)
0080	offEncPN_L:	UINT:=0;	(*Offset of low value PN encoder*)
0081	Pulses_Cm:	INT:=408;	(*Broj impulsa enkodera po cm*)
0082	DozZakosenje:	INT:=50;	(*Dozvoljeno zakosenje [cm]*)
0083	K_Z_1:	INT:=236230;	(*1 / Proporcionalno pojacanje - Zakosenje*)
0084	Limit_2U_Z:	INT:=10;	(*Limit 2U (%) - Zakosenje*)
0085	MinZaktiz:	INT:=4;	(*Minimalno zakosenje za izravnavanje [cm]*)
0086	DuzinaMarkera:	INT:=50;	(*Duzina markera [cm]*)

Slika P2.2. Podešenja za pogon kretanja mosta

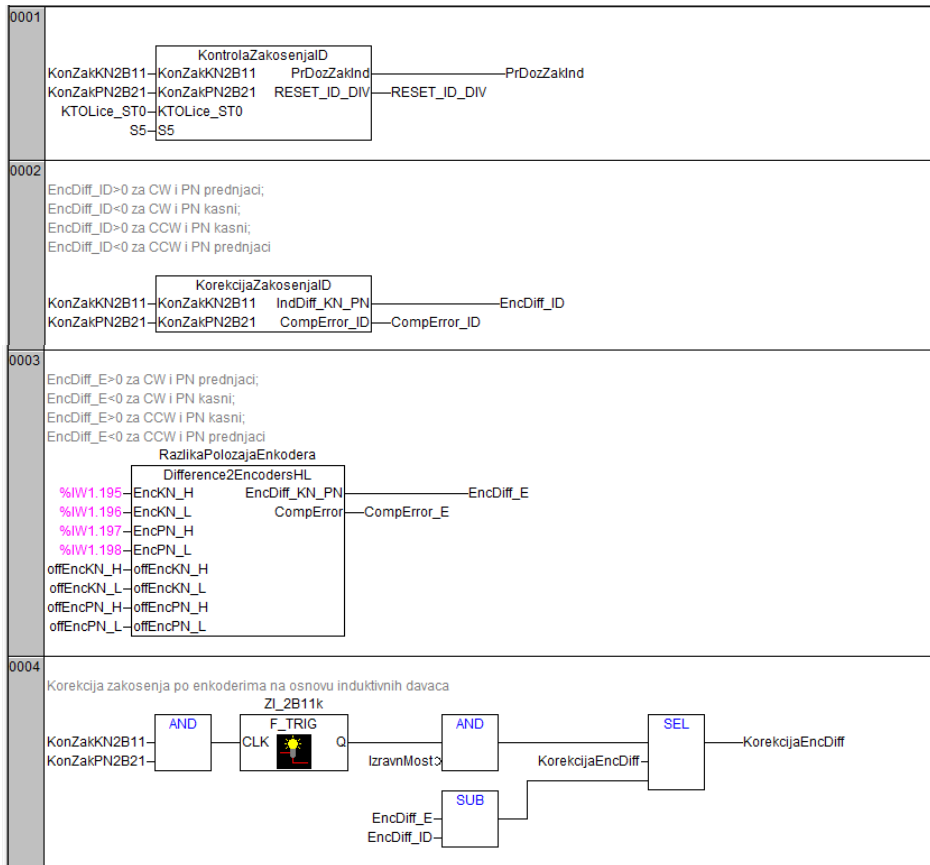
PLC funkcijski blok regulatora raspodele opterećenja (“RaspOptMSf”), koji se izvršava u programskim linijama 45 i 47 sa slike P2.1, prikazan je na slici P1.3. Detaljno je analiziran u Prilogu 1.

PLC potprogram za regulator zakošenja (“Zakosenje”), koji se izvršava u programskoj liniji 1 sa slike P2.1, dat je na slikama P2.3 i P2.4. Navedeni potprogram odgovara algoritmu PLC programa za regulator zakošenja, koji je prikazan na slici 3.4.

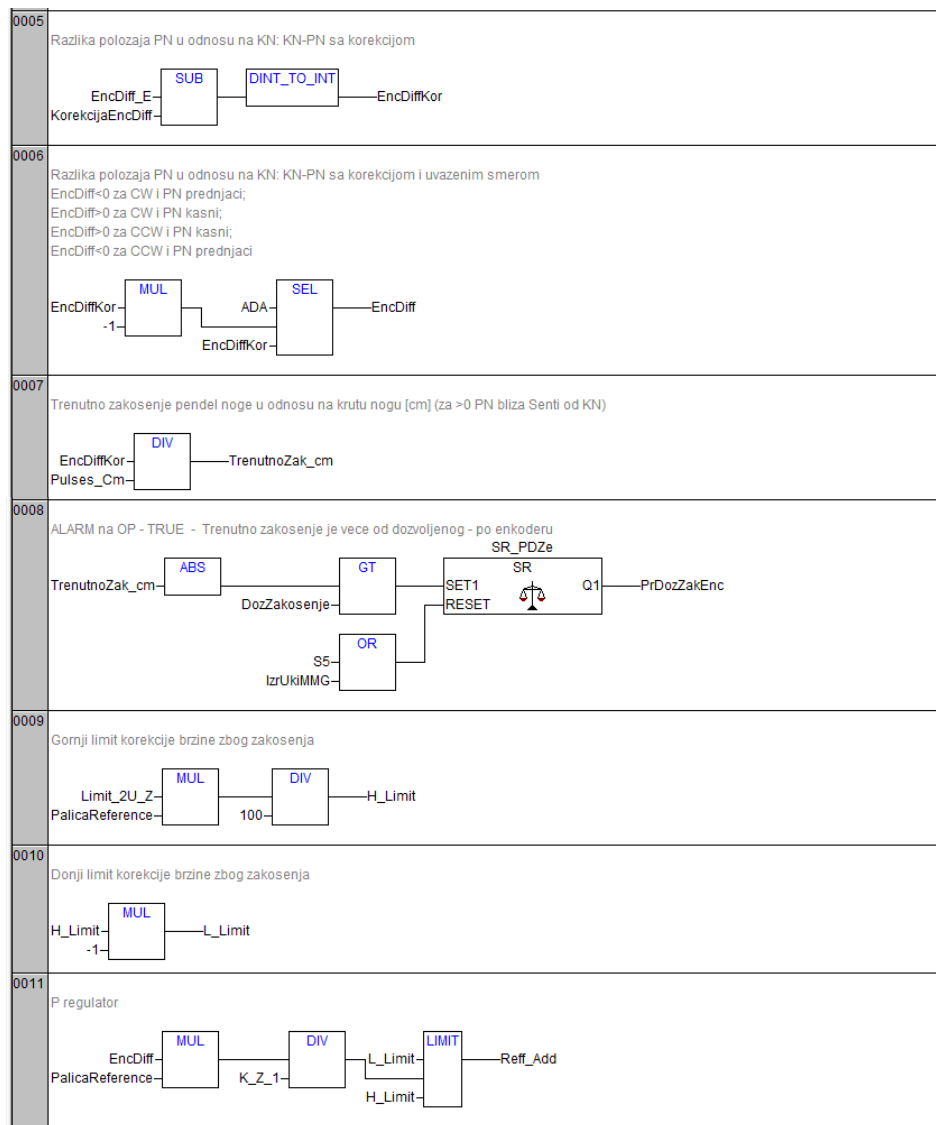
```

0001 PROGRAM Zakosenje
0002 VAR
0003   EncDiff_ID: DINT; (*Razlika položaja PN u odnosu na KN: KN-PN*)
0004   CompError_ID: BOOL; (*ALARM na OP - Computation error - LIMIT of SUBD*)
0005   RazlikaPolozajaEnkodera: Difference2EncodersHL;
0006   EncDiff_E: DINT; (*Razlika položaja PN u odnosu na KN: KN-PN*)
0007   CompError_E: BOOL; (*ALARM na OP - Computation error - LIMIT of SUBD*)
0008   ZI_2B11k: F_TRIG;
0009   EncDiffKor: INT; (*Razlika položaja PN u odnosu na KN: KN-PN sa korekcijom*)
0010   EncDiff: INT; (*Razlika položaja PN u odnosu na KN: KN-PN sa korekcijom i uvazanim smerom*)
0011   TrenutnoZak_cm: INT; (*Trenutno zakosenje pendel noge u odnosu na krutu nogu [cm] (za >0 PN bliza Senti od KN)*)
0012   SR_PDZe: SR;
0013   H_Limit: INT; (*Gornji limit korekcije brzine zbog zakosenja*)
0014   L_Limit: INT; (*Donji limit korekcije brzine zbog zakosenja*)
0015   TrZak: WordTo2Byte;
0016   TrZakN: BYTE;
0017   TrZakV: BYTE;
0018   RESET_ID_DIV: BOOL; (*Reset u slucaju nailaska na metal koji nije marker*)
0019 END_VAR
0020 VAR_INPUT
0021   KonZakKN2B11: BOOL; (*2B11 - Kontrola zakosenosti kruta noga*)
0022   KonZakPN2B21: BOOL; (*2B21 - Kontrola zakosenosti pendel noga*)
0023   S5: BOOL; (*Taster RESET KVARA*)
0024   PalicaReference: INT; (*Referenca iz palice*)
0025   IzrUkIMMG: BOOL; (*ALARM na OP - Zakosenje je u minimalnim granicama - izravnavanje ukinuto*)
0026   KTOLice_STO: BOOL; (*STO - Kljuc taster ovlasceno lice - %IX8.1*)
0027 END_VAR
0028 VAR_OUTPUT
0029   Reff_Add: INT; (*Velicina koja se dodaje referenci za PN*)
0030   PrDozZakInd: BOOL; (*ALARM na OP - Trenutno zakosenje je vece od dozvoljenog - po induktivnim davacima*)
0031   PrDozZakEnc: BOOL; (*ALARM na OP - Trenutno zakosenje je vece od dozvoljenog - po enkoderu*)
0032   CompError: BOOL; (*ALARM na OP - Computation error - LIMIT of SUBD*)
0033   PN_KN_K1_Prednjaci: BOOL; (*Polozej PN u odnosu na KN a u odnosu na kabinu 1*)
0034   DozravnMost: BOOL; (*Dozvola za izravnavanje mosta - minimalno zakosenje [cm]*)
0035 END_VAR

```



Slika P2.3. Potprogram za regulator zakošenja – programske linije 1 do 4



Slika P2.4. Potprogram za regulator zakošenja – programske linije 5 do 11

Potprogram “KontrolaZakosenjaID” izvršava se u programskoj liniji 1 potprograma za regulator zakošenja “Zakosenje” (slika P2.3). Navedeni potprogram odgovara algoritmu PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M)”, koji je prikazan na slici 3.5. Ovaj potprogram, na osnovu informacija sa induktivnih davača “KonZakKN2B11” i “KonZakPN2B21”, a dobijenih pri prelasku preko markera, kontroliše zakošenje i u slučaju kada je zakošenje veće od dužine markera (“DuzinaMarkera”, slika P2.2) daje signal za blokadu rada pogona kretanja mosta, “PrDozZakInd”. Kontrola zakošenja ovim blokom nezavisna je od funkcionalnosti enkodera i od svih spoljašnjih poremećaja, a aktivna je pri prelasku pogona preko markera.

U programskoj liniji 2 izvršava se potprogram “KorekcijaZakosenjaID”, koji odgovara algoritmu PLC programa za blok “razlika pozicija (M)”, prikazanom na slici 3.6. Ovaj potprogram meri razliku pozicija krute noge i pendel noge mosta, odnosno stvarnu vrednost zakošenja

konstrukcije, a kao razliku apsolutnih pozicija dva enkodera u trenutka aktiviranja induktivnih davača, “KonZakKN2B11” i “KonZakPN2B21”, nailaskom na markere. Stvarna vrednost zakošenja konstrukcije, “EncDiff_ID”, uvažava se kada induktivni davači postanu neaktivni, odnosno kada pređu preko markera.

Funkcijski blok “RazlikaPolozajaEnkodera” izvršava se u programskoj liniji 3, a odgovara algoritmu PLC programa za blok “razlika pozicija (E)”, koji je prikazan na slici 3.7. Ovaj blok računa razliku apsolutnih pozicija dva enkodera, “EncDiff_E”, montiranih na slobodnim točkovima krute noge i pendel noge mosta, i to u svakom procesorskom ciklusu.

U programskoj liniji 4 vrši se proračun kompenzacije, koja je jednaka razlici razlike apsolutnih pozicija dva enkodera, “EncDiff_E”, i stvarne vrednosti zakošenja konstrukcije, “EncDiff_ID”. Kompenzacija, “KorekcijaEncDiff”, računa se kada induktivni davači “KonZakKN2B11” i “KonZakPN2B21” postanu neaktivni, odnosno kada pređu preko markera. Programska linija 4 odgovara algoritmu PLC programa za blok “kompenzacija”, koji je prikazan na slici 3.8.

U programskim linijama 5 do 7 potprograma za regulator zakošenja “Zakosenje” (slika P2.4) vrši se proračun zakošenja, koje je jednako razlici razlike apsolutnih pozicija dva enkodera, “EncDiff_E”, i kompenzacije, “KorekcijaEncDiff”, i to u svakom procesorskom ciklusu. Sračunata vrednost zakošenja, “TrenutnoZak_cm”, jednaka je stvarnom zakošenju kada induktivni davači pređu preko markera, odnosno kada se izvrši kompenzacija. Između dva proračuna kompenzacije sračunata vrednost zakošenja može da odstupa od stvarne vrednosti zbog uticaja spoljašnjih poremećaja. Programske linije 5 do 7 odgovaraju algoritmu PLC programa za blok “zakošenje”, koji je prikazan na slici 3.9.

U programskoj liniji 8 vrši se kontrola zakošenja konstrukcije poređenjem sračunate vrednosti zakošenja, “TrenutnoZak_cm”, i maksimalno dozvoljenog zakošenja, “DozZakosenje” (slika P2.2), i to u svakom procesorskom ciklusu. U slučaju kada je sračunato zakošenje veće od maksimalno dozvoljenog zakošenja, daje se signal za blokadu rada pogona kretanja mosta “PrDozZakEnc”. Programska linija 8 odgovara algoritmu PLC programa za blok “kontrola zakošenja (M i E)”, koji je prikazan na slici 3.10.

U programskim linijama 9 i 10 vrši se proračun graničnih vrednosti limitera regulatora zakošenja u o/min, a na osnovu zadate vrednosti u procentima “Limit_2U_Z” (slika P2.2).

U programskoj liniji 11, na osnovu zadate vrednosti brzine obrtanja pogona “PalicaReference” i sračunate vrednosti zakošenja “EncDiff”, vrši se proračun korekcije za zadatu vrednost brzine obrtanja frekvencijskog pretvarača 2U2, “Reff_Add”, i to u svakom procesorskom ciklusu. Vrednost korekcije ograničava se limiterom unutar sračunatih graničnih vrednosti, a da bi se osigurao stabilan rad pogona pri velikim spoljašnjim poremećajima. Programska linija 11,

zajedno sa programskom linijom 46 sa slike P2.1, odgovara algoritmu PLC programa za blok “regulacija zakošenja”, koji je prikazan na slici 3.11.

Razmena podataka između PLC-a, frekvencijskih pretvarača 2U1 do 2U4 i apsolutnih enkodera 2B1 i 2B2, realizovana je industrijskom komunikacionom mrežom PROFIBUS DP. U Prilogu 1, na slici P1.4, data je topologija komunikacione mreže pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, formirana korišćenjem softvera “907 AC 1131”. PLC je glavni čvor (“DP-Master”), dok su frekvencijski pretvarači (2U1 do 2U4) i apsolutni enkoderi (2B1 i 2B2) podređeni čvorovi (“DP-Slave”).

Deo tehničke dokumentacije, koji se odnosi na PROFIBUS DP komunikacionu mrežu pretovarnog mosta u Fabrici šećera TE-TO Senta, prikazan je na slici P1.5 (Prilog 1). Na datoj slici, PLC je obeležen sa “Nod:1”, frekvencijski pretvarači 2U1 do 2U4 sa “Nod:6” do “Nod:9”, a apsolutni enkoderi 2B1 i 2B2 sa “Nod:15” i “Nod:16”, respektivno.

Prilog 3

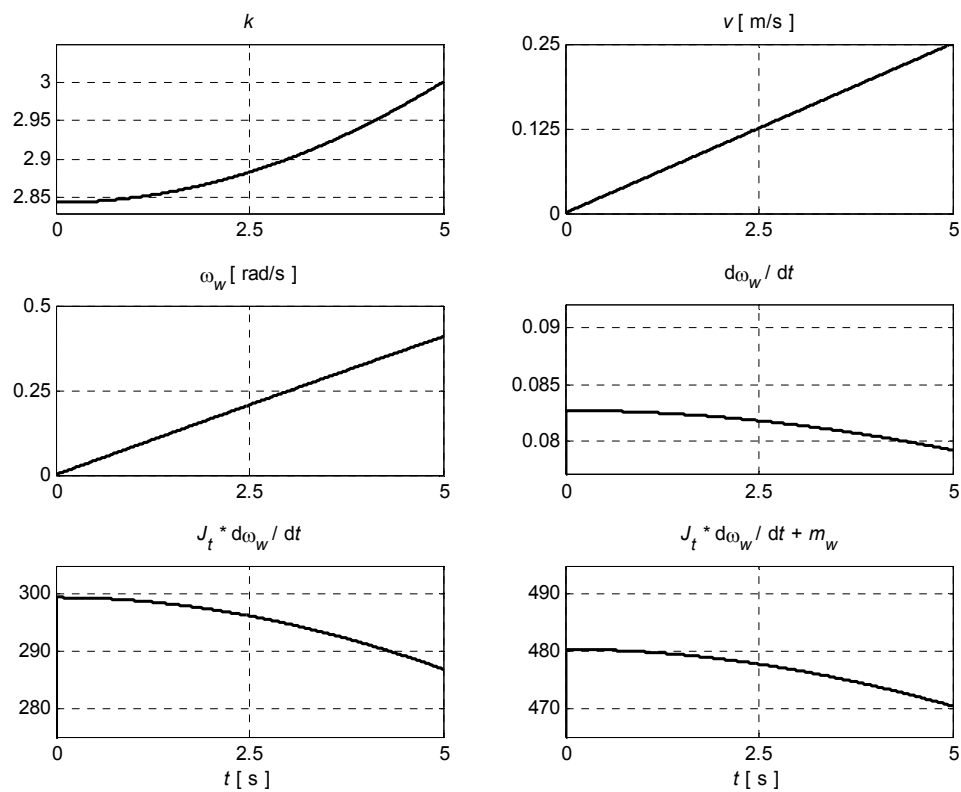
U ovom prilogu date su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina iz izraza 4.32 do 4.36, dobijene korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004, a u cilju dokazivanja tvrđenja iz izraza 4.37 do 4.40 i izraza 4.45 do 4.48.

Vremenske zavisnosti su snimljene za karakteristične položaje kрана, prikazane na slici 4.6, odnosno za $k \approx 3$ i $k \approx 34$. Odnose se na režim rada kabl-bubnja sa konstantnom brzinom kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja / odmotavanja kabla, $v = \pm 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, i na režim rada kabl-bubnja pri zaletanju i kočenju kрана sa konstantnim ubrzanjem / usporenjem (tj. konstantnom “rampom”), $a = \pm \frac{0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}}$.

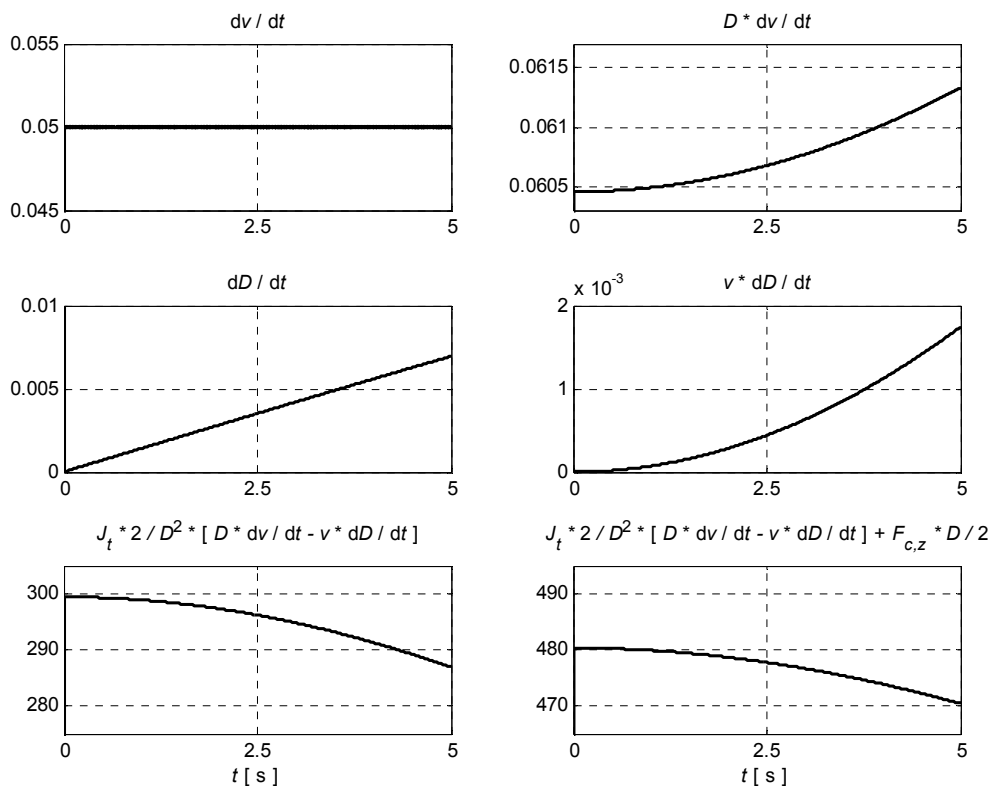
Na slikama P3.1 i P3.2 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina snimljene pri namotavanju kabla i to pri zaletanju kрана sa konstantnim ubrzanjem, a za karakteristične položaje kрана, odnosno za $k \approx 3$ i $k \approx 34$ respektivno. Date vremenske zavisnosti snimljene su u cilju dokazivanja tvrđenja iz poglavlja 4.1.1, navedenih u izrazu 4.38. Analizom slika P3.1.a) i P3.2.a) jasno je da važi $\frac{d\omega_w}{dt} > 0$ i $J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w > 0$. Takođe, analizom slika P3.1.b) i P3.2.b), nameće se zaključak da važi $\frac{dv}{dt} > 0$, $\frac{dD}{dt}$ malo veće od 0 i $J_t \cdot \frac{2}{D^2} \cdot \left[D \cdot \frac{dv}{dt} - v \cdot \frac{dD}{dt} \right] + F_{c,z} \cdot \frac{D}{2} > 0$. Time su, korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004, tvrđenja iz izraza 4.38 dokazana.

Na sličan način, analizom slika P3.3 do P3.12, može se zaključiti da važe i tvrđenja iz izraza 4.37, 4.39, 4.40 i 4.45 do 4.48.

Analizom slike P3.2.b) jasno je da važi $D \cdot \frac{dv}{dt} \gg v \cdot \frac{dD}{dt}$, čime je dokazano tvrđenje iz poglavlja 4.2, navedeno u izrazu 4.59.

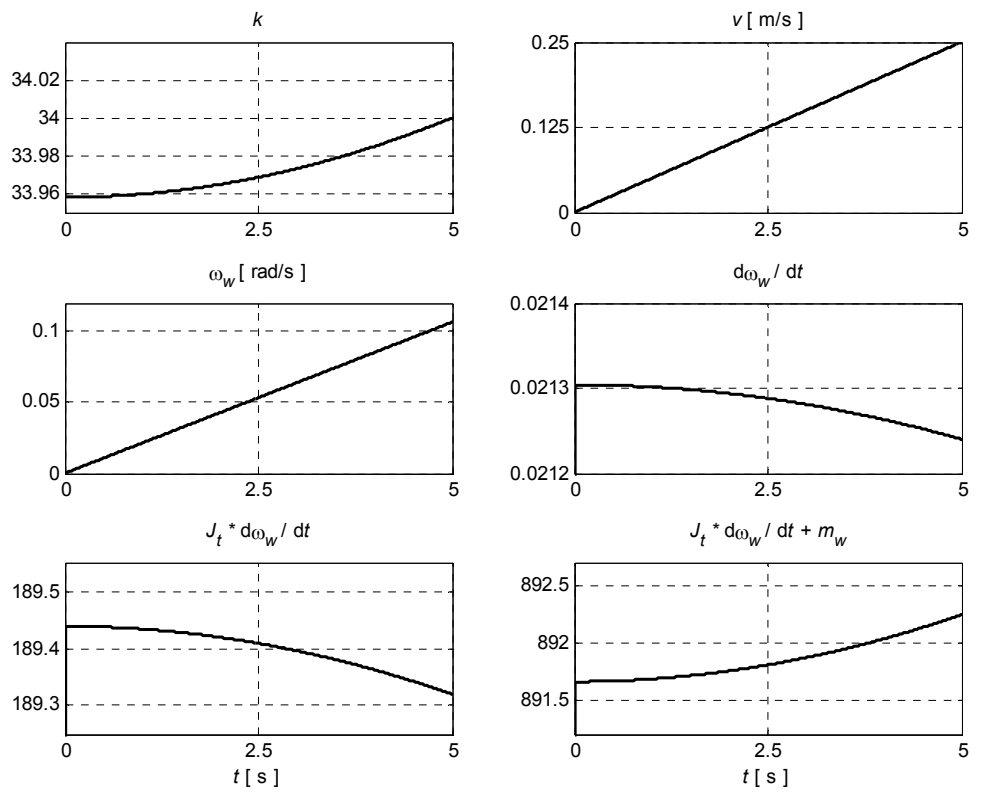


a)

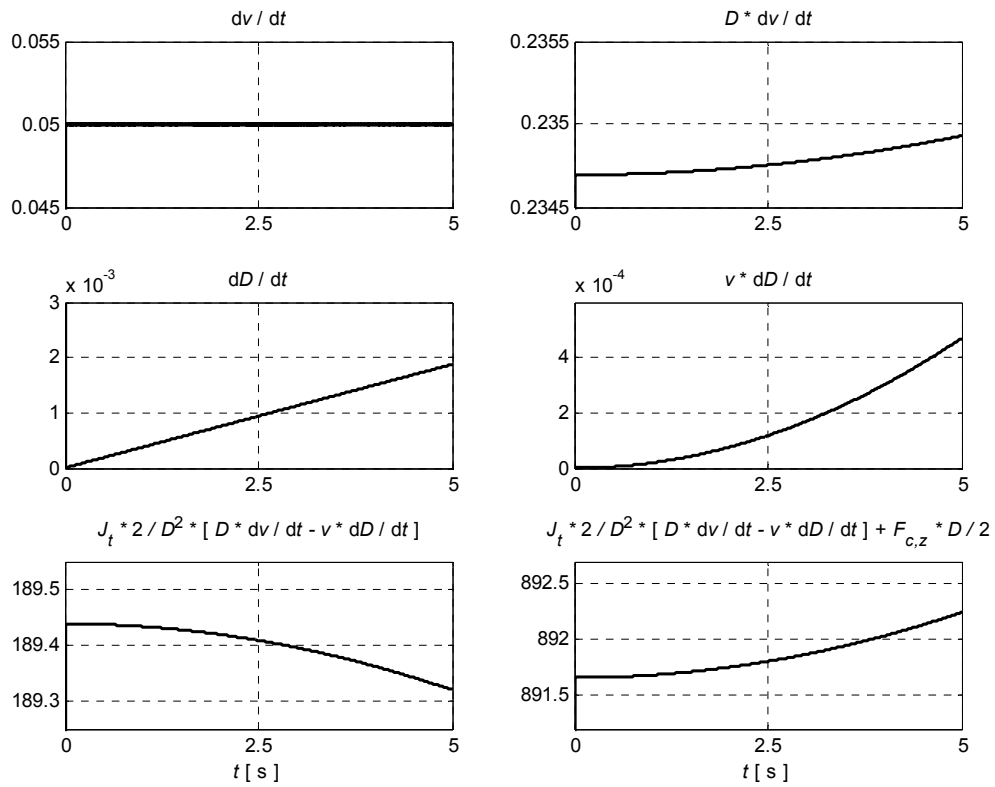


b)

Slika P3.1. Režim rada: namotavanje kabla, zaletanje kрана, $k \approx 3$

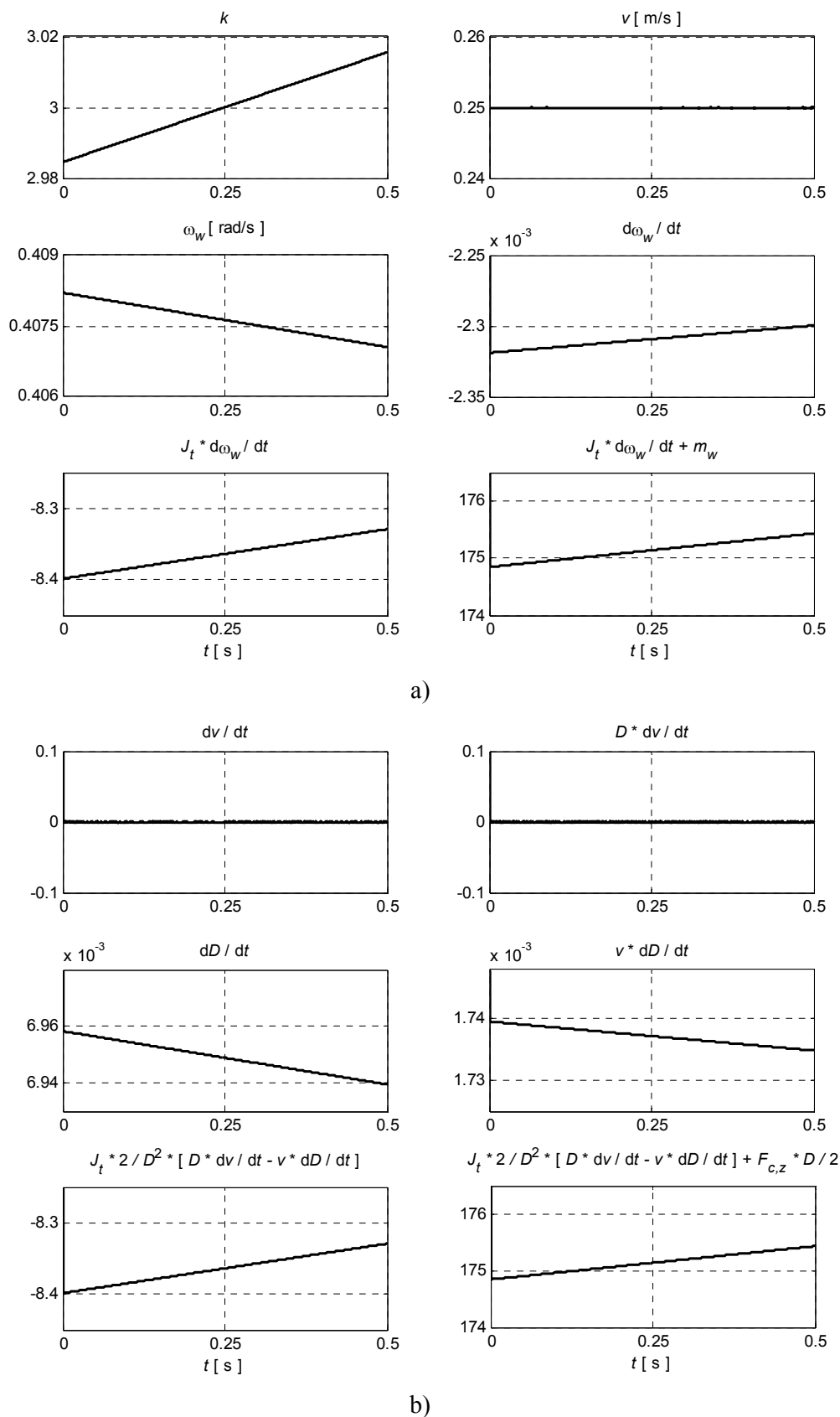


a)

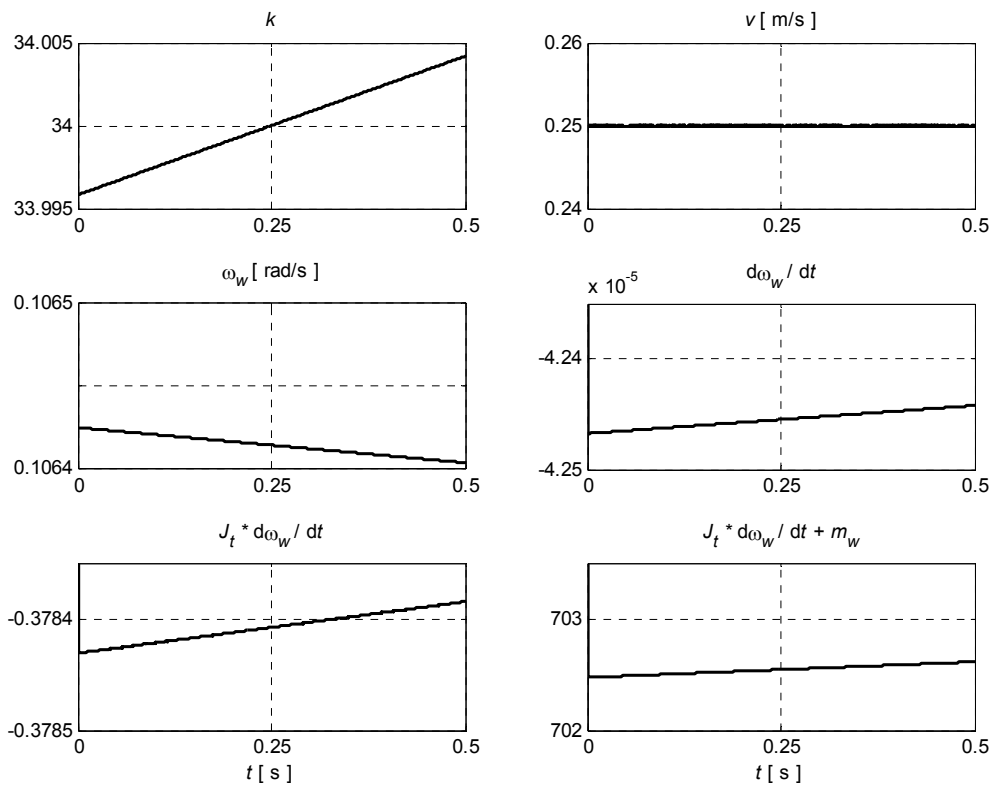


b)

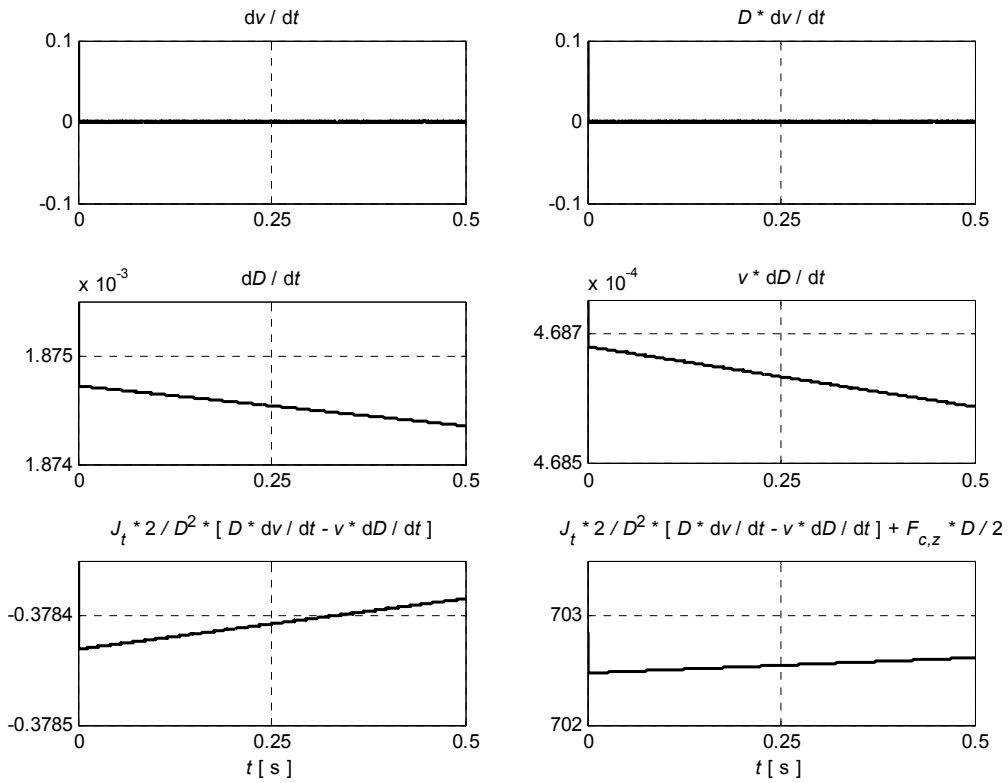
Slika P3.2. Režim rada: namotavanje kabla, zaletanje kрана, $k \approx 34$



Slika P3.3. Režim rada: namotavanje kabla, konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 3$

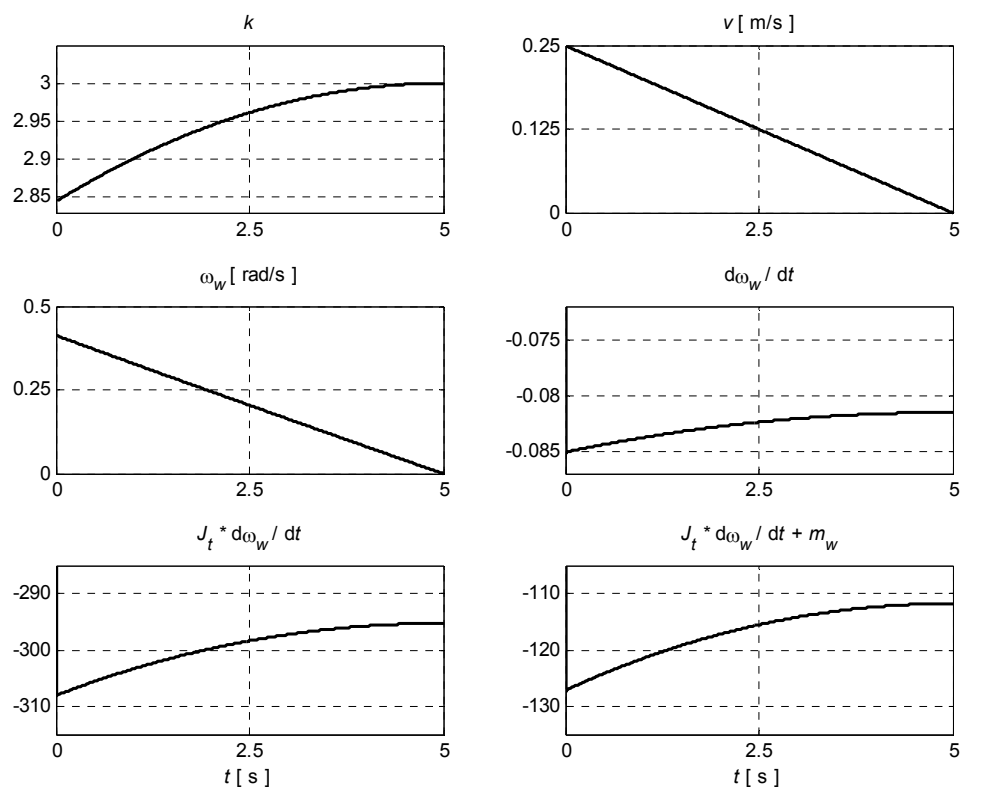


a)

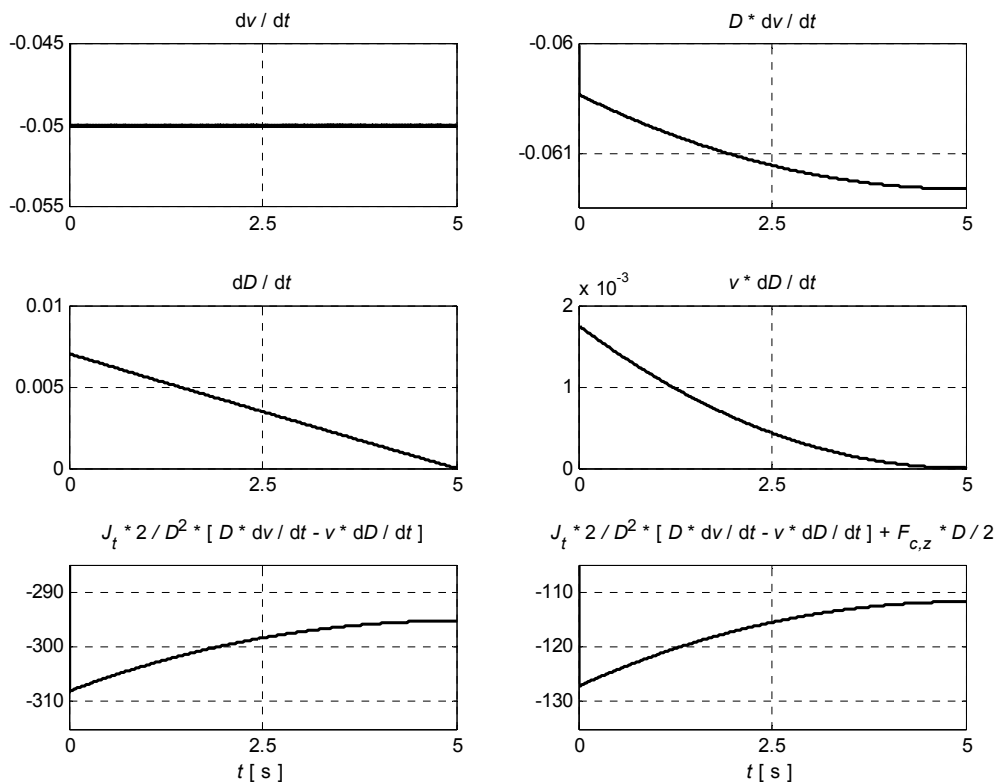


b)

Slika P3.4. Režim rada: namotavanje kabla, konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 34$

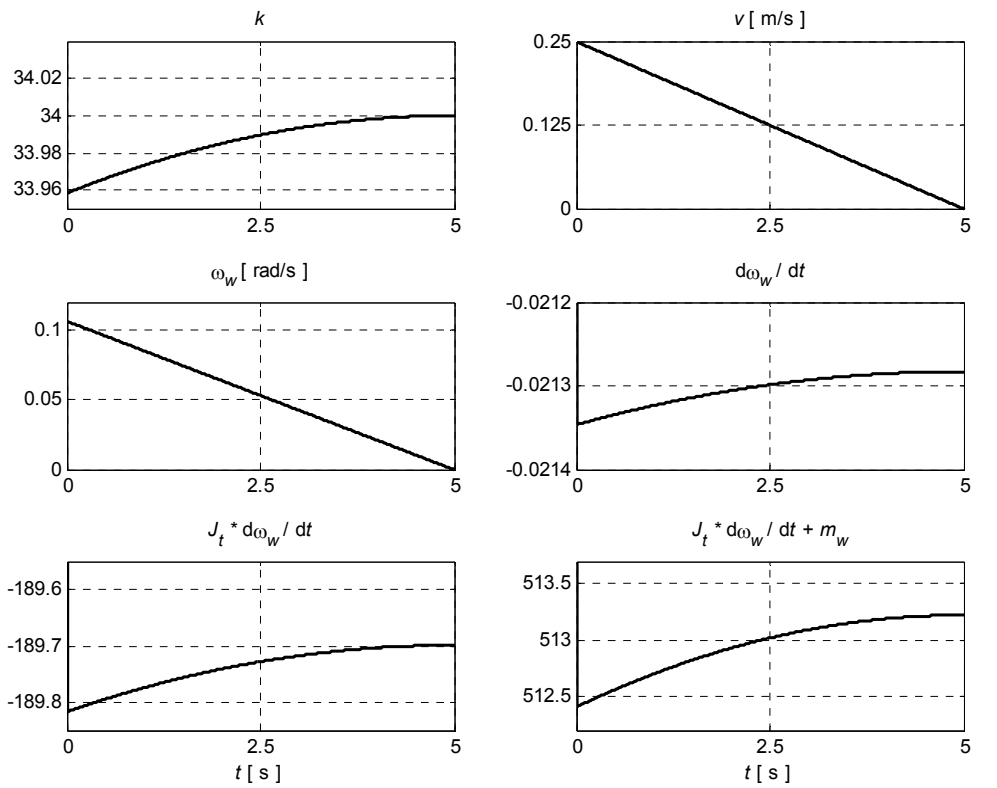


a)

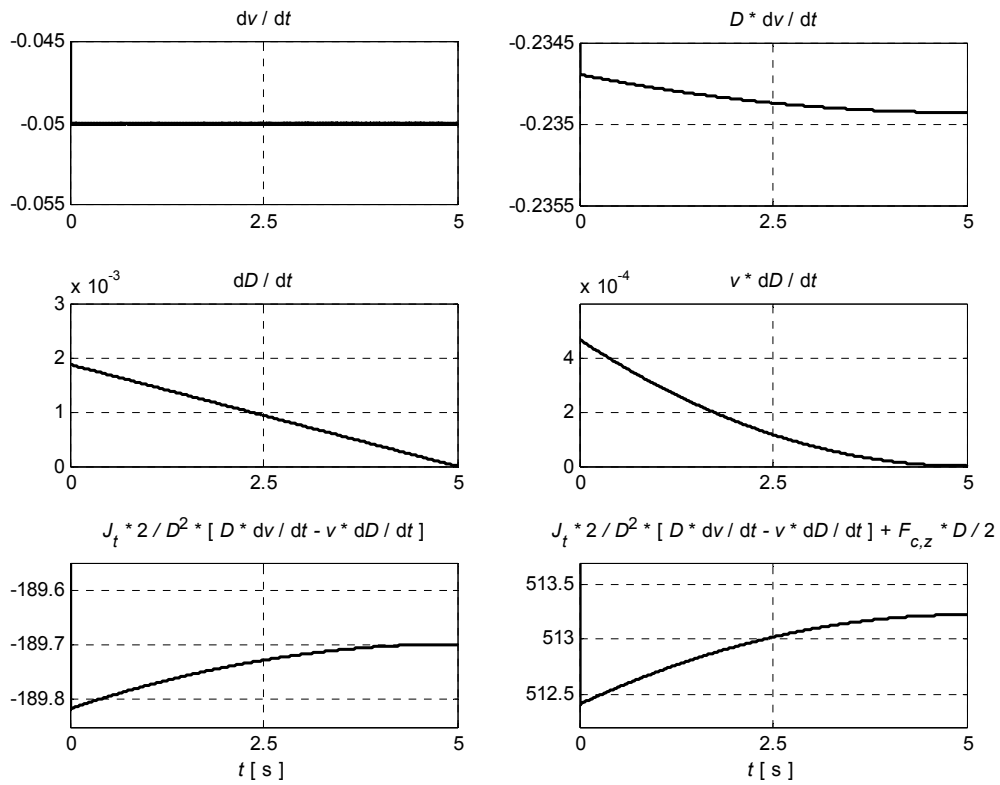


b)

Slika P3.5. Režim rada: namotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 3$

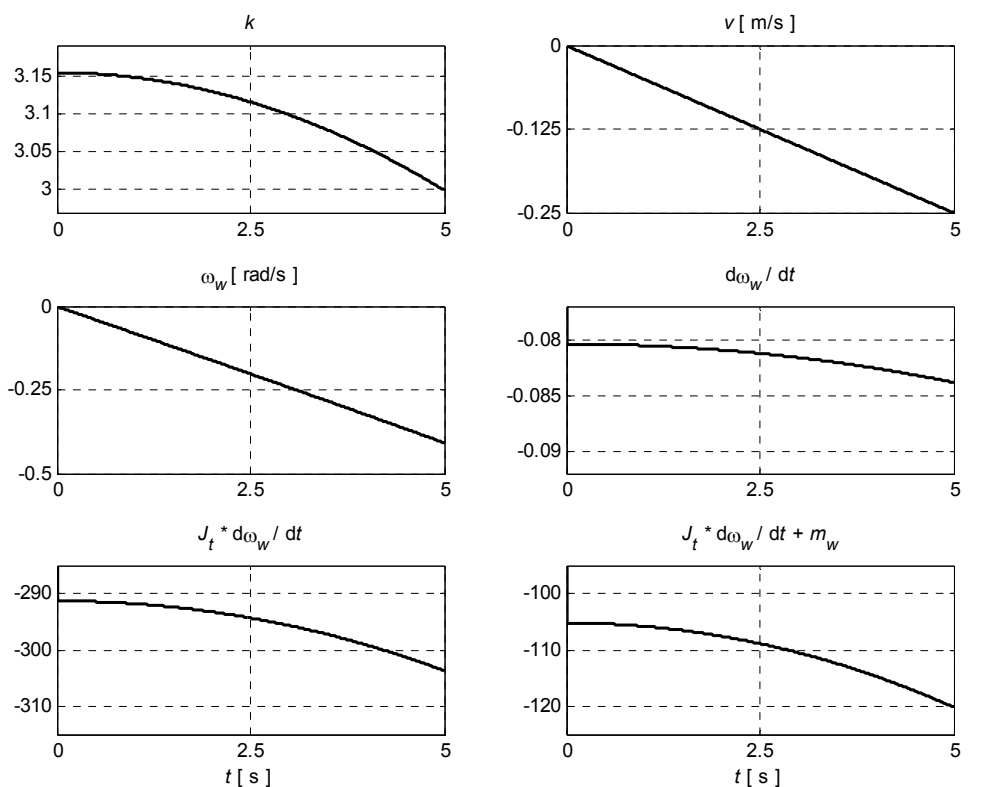


a)

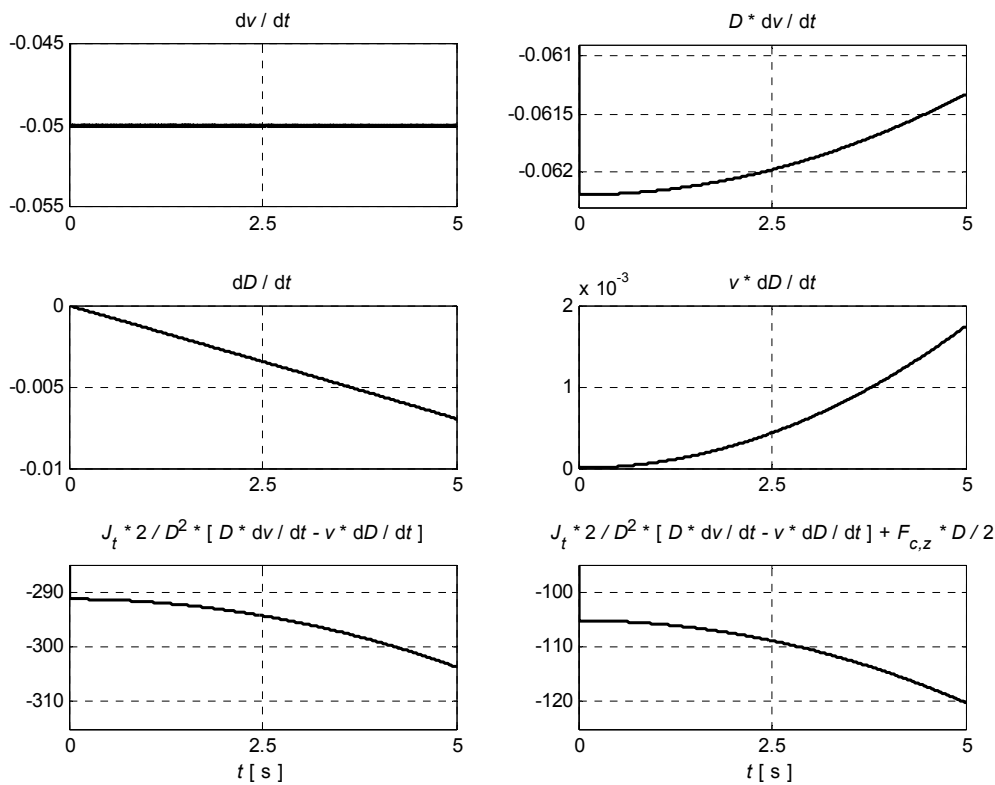


b)

Slika P3.6. Režim rada: namotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 34$

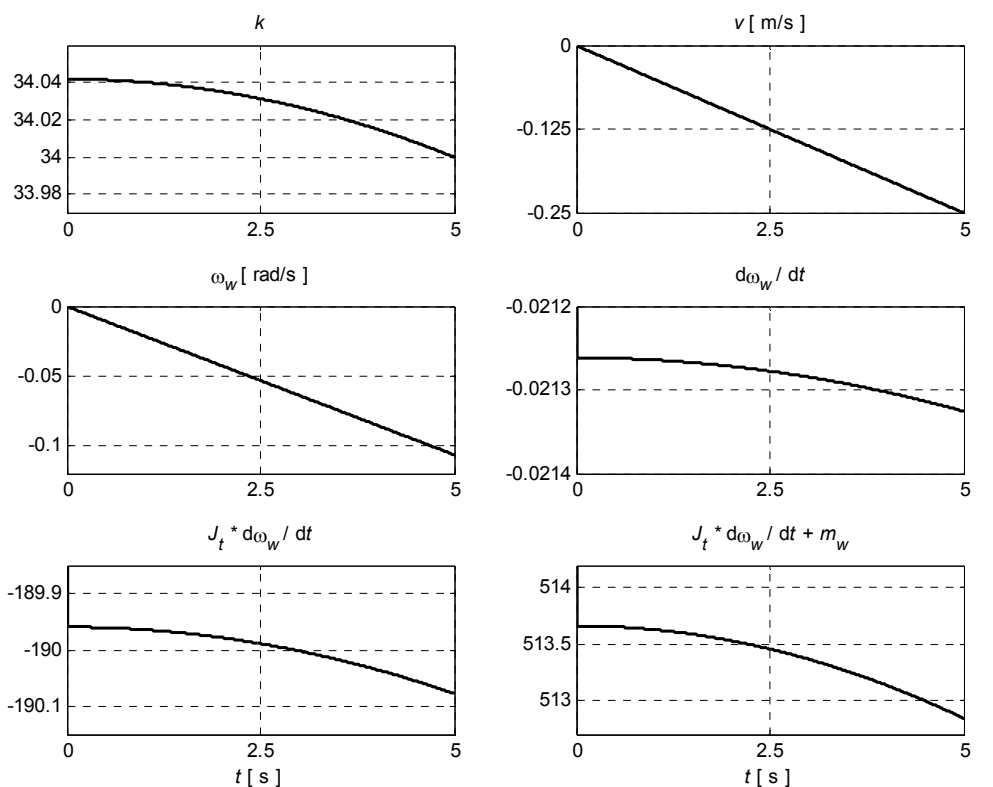


a)

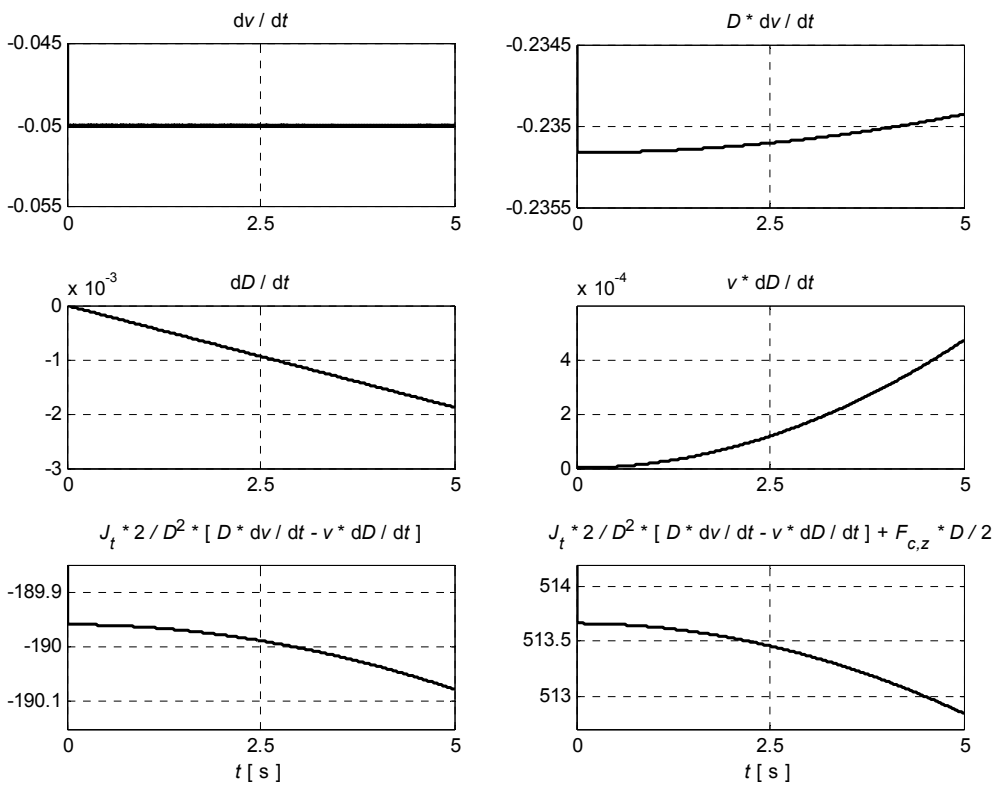


b)

Slika P3.7. Režim rada: odmotavanje kabla, zaletanje kрана, $k \approx 3$

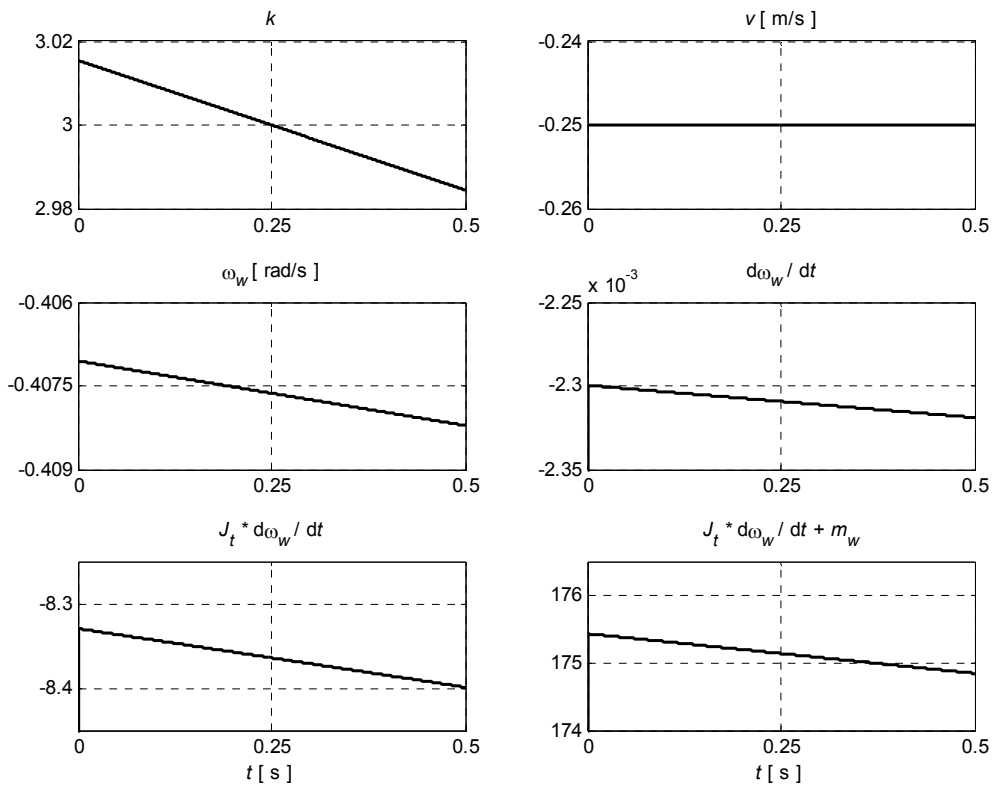


a)

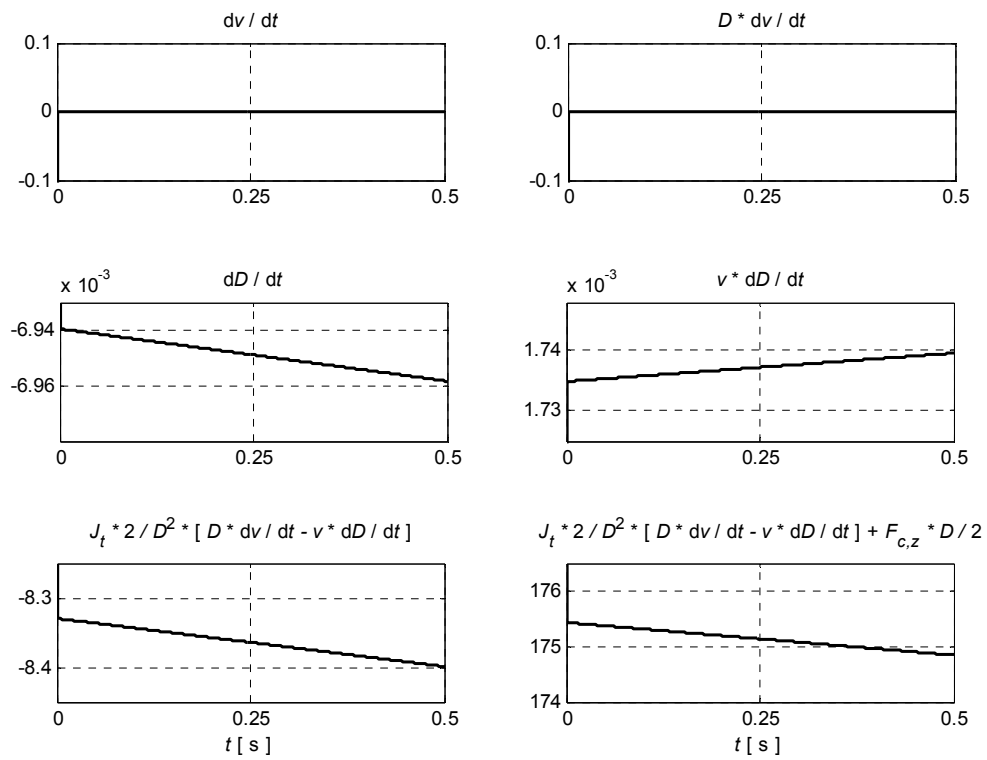


b)

Slika P3.8. Režim rada: odmotavanje kabla, zaletanje kрана, $k \approx 34$

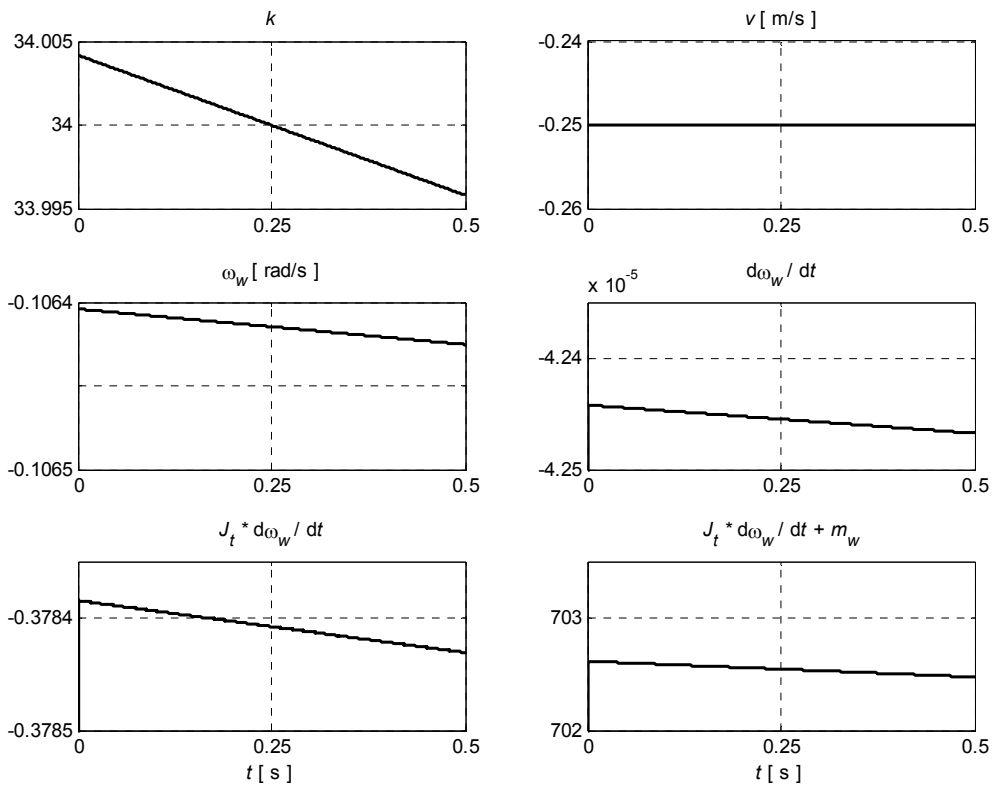


a)

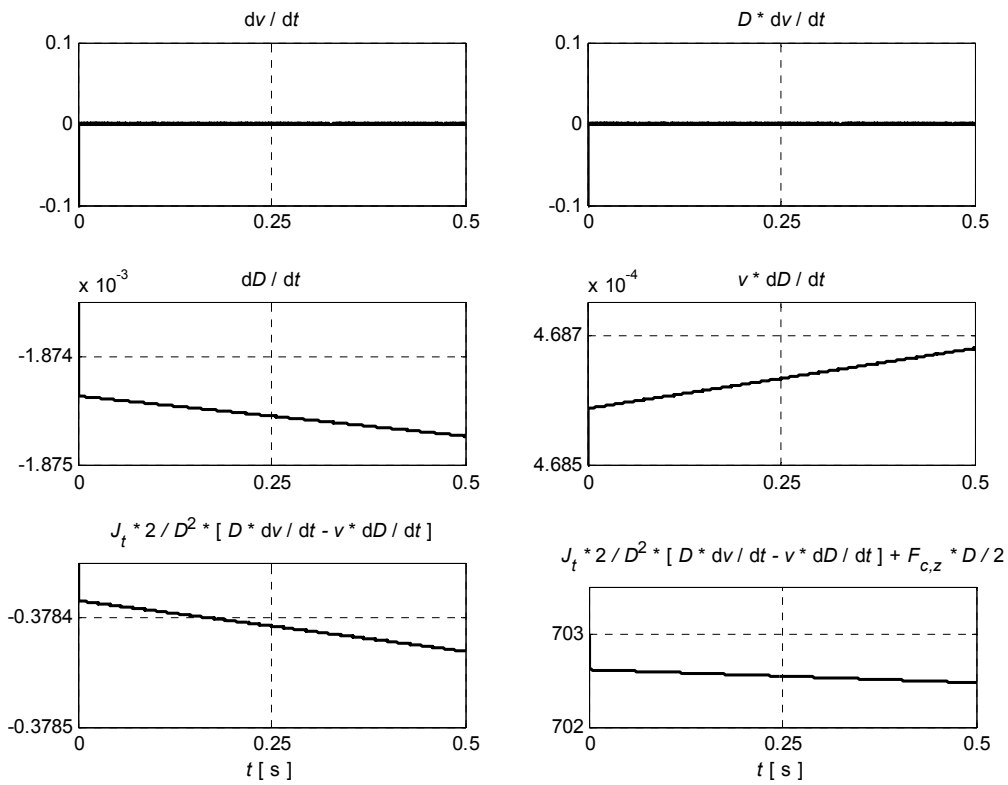


b)

Slika P3.9. Režim rada: odmotavanje kabla, konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 3$

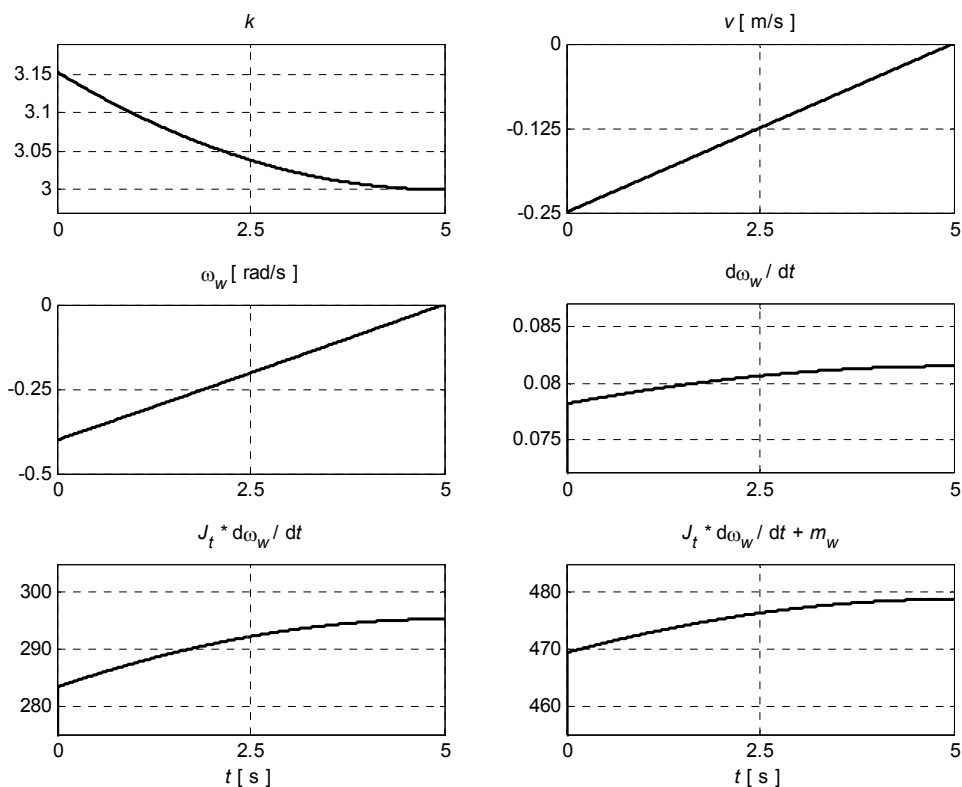


a)

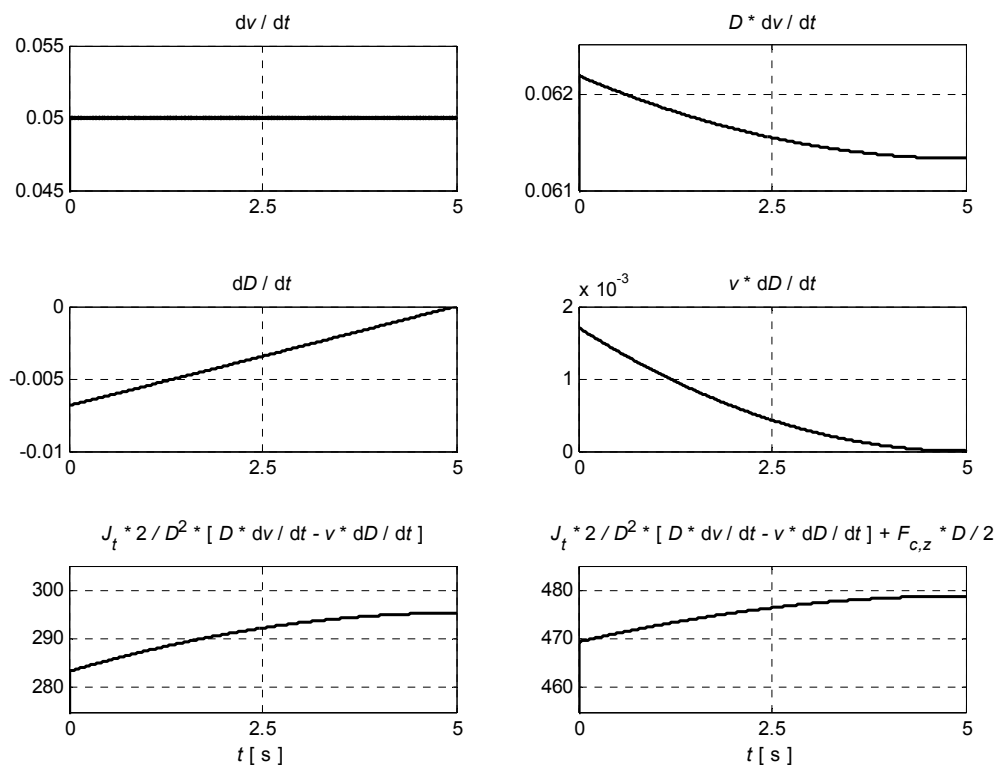


b)

Slika P3.10. Režim rada: odmotavanje kabla, konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 34$

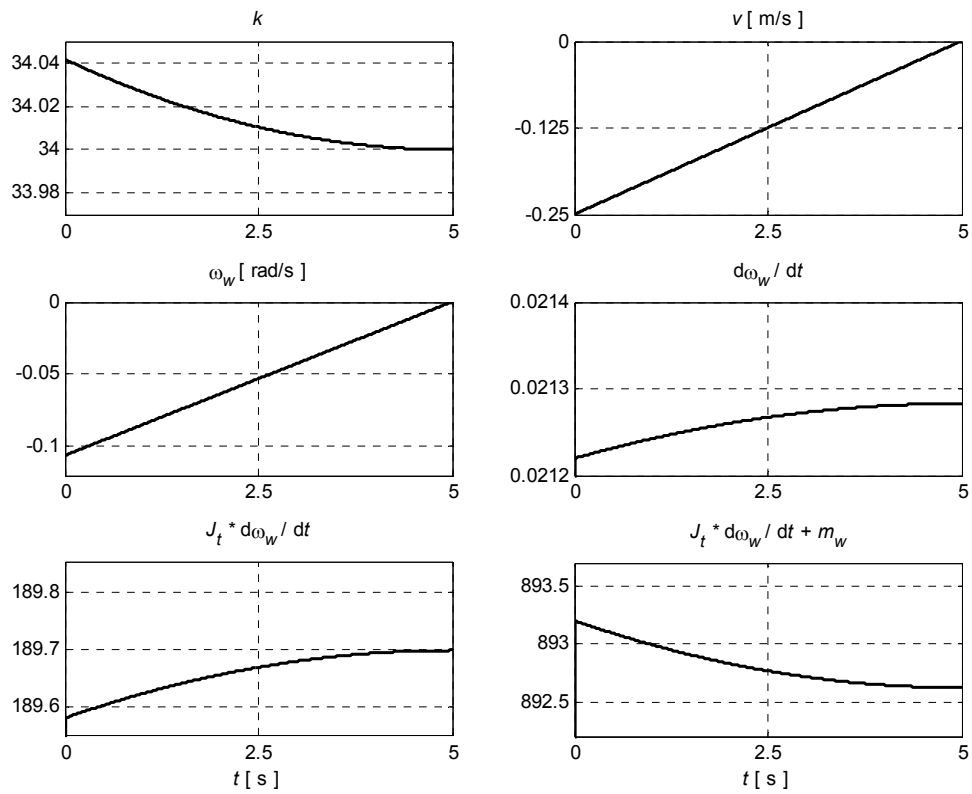


a)

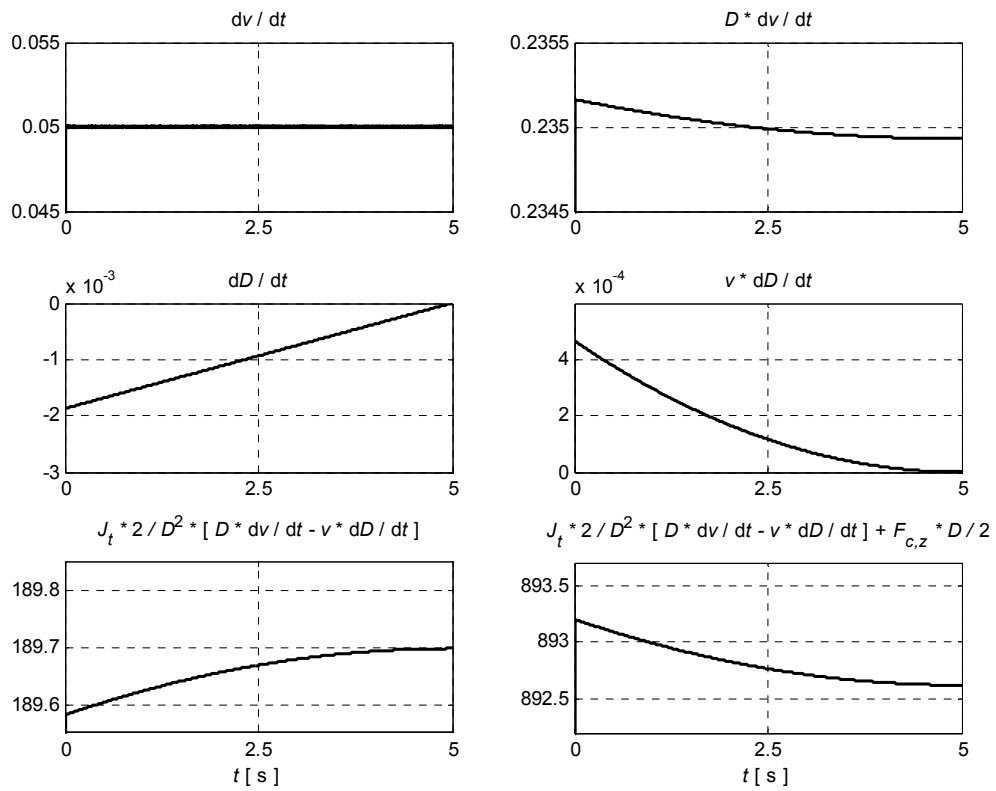


b)

Slika P3.11. Režim rada: odmotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 3$



a)



b)

Slika P3.12. Režim rada: odmotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 34$

Prilog 4

U ovom prilogu date su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina iz izraza 4.51 do 4.53, dobijene korišćenjem simulacionog modela pogona kabl-bubnja na Derik kranu DK004, a u cilju dokazivanja tvrđenja i opravdanosti uvedenih zanemarenja iz poglavlja 4.2, vezanih za izbor motora.

Vremenske zavisnosti su snimljene za karakteristične položaje kрана, prikazane na slici 4.6, odnosno za $k \approx 3$ i $k \approx 34$. Odnose se na režim rada kabl-bubnja sa konstantnom brzinom kretanja kрана koja je jednaka linijskoj brzini namotavanja / odmotavanja kabla, $v = \pm 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, i na režim rada kabl-bubnja pri zaletanju i kočenju kрана sa konstantnim ubrzanjem / usporanjem (tj. konstantnom “rampom”), $a = \pm \frac{0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}}$.

Napomena: vremenske zavisnosti su snimljene za usvojeni moment inercije motora $0.0036 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

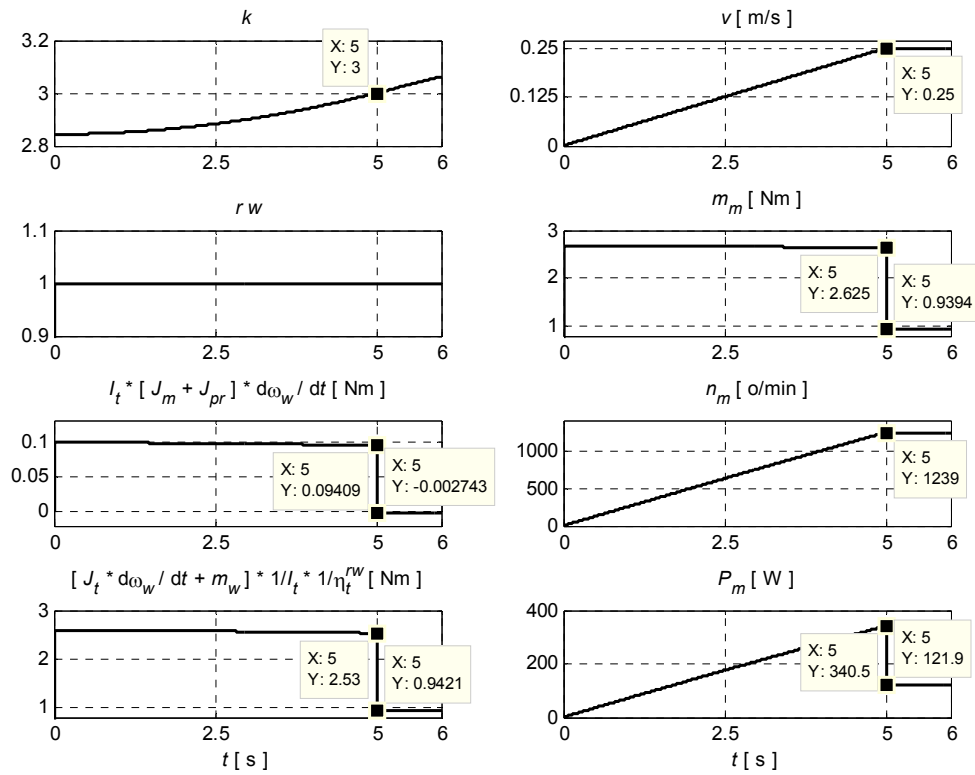
Analizom slika P4.1. do P4.8 jasno je da se maksimalno potrebni moment motora očekuje pri položaju kрана pored priključnog mesta, odnosno na sredini kranske staze, pri maksimalnom broju namota kabla na kabl-bubnju, $k_{\text{max}} = 34$, a pri namotavanju kabla u režimu zaletanja kрана ($m_m=4.825 \text{ Nm}$, slika P4.5). Time je dokazano tvrđenje iz poglavlja 4.2 da je, u cilju izbora motora za pogon kabl-bubnja, što se tiče momenta, dovoljno sračunati maksimalno potrebni moment motora pri položaju kрана pored priključnog mesta i to pri namotavanju kabla u režimu zaletanja kрана. Takođe, za navedeni slučaj, analizom slike P4.5 može se zaključiti da je, u cilju uprošćenja, opravdano zanemariti dinamiku motora i pužnog reduktora, s obzirom da važi:

$$I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt} \ll \left(J_t \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + m_w \right) \cdot \frac{1}{I_t} \cdot \frac{1}{\eta_t^{rw}},$$

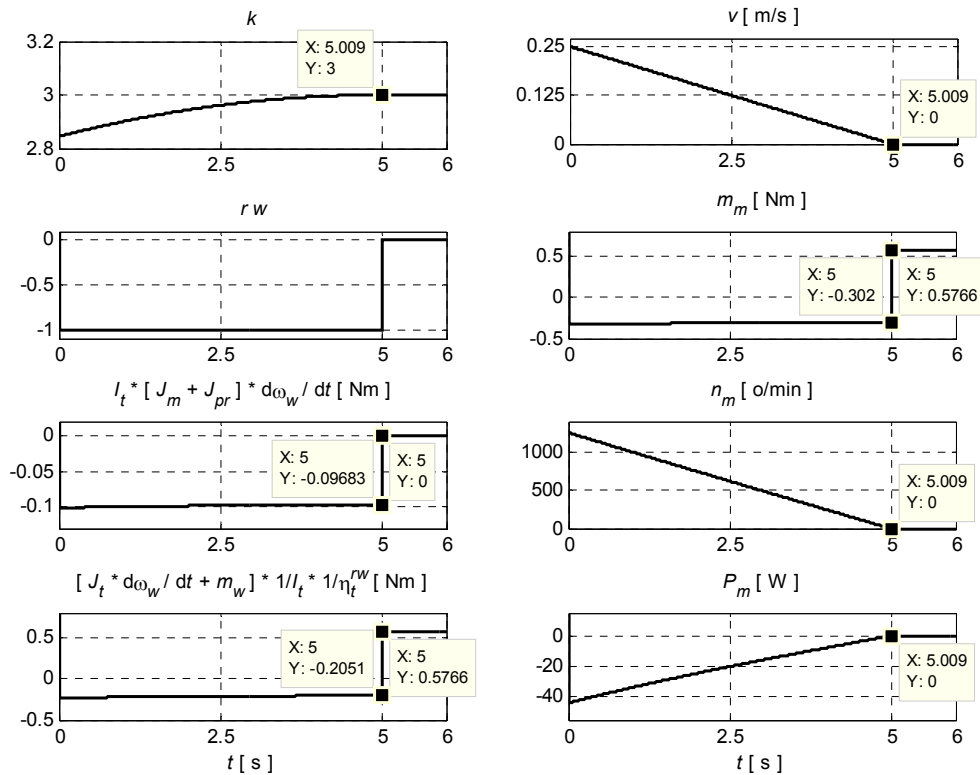
jer je 0.02523 Nm mnogo manje od 4.8 Nm .

Imajući u vidu napred navedeno, pri izboru motora za pogon kabl-bubnja, izraz za moment motora 4.51, dat u praktičnijem obliku 4.58, može da se uprosti zanemarenjem proizvoda sa činiocem $v \cdot \frac{dD}{dt}$ (tvrđenje 4.59, dokazano u Prilogu 3) i zanemarenjem sabirka $I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{d\omega_w}{dt}$, odnosno $I_t \cdot (J_m + J_{pr}) \cdot \frac{2}{D^2} \cdot D \cdot \frac{dv}{dt}$. Na opisan način, dobijen je praktično primenjiv izraz za maksimalno potrebni moment motora 4.64, koji sa dovoljnom tačnošću može da se iskoristi za izbor motora za pogon kabl-bubnja.

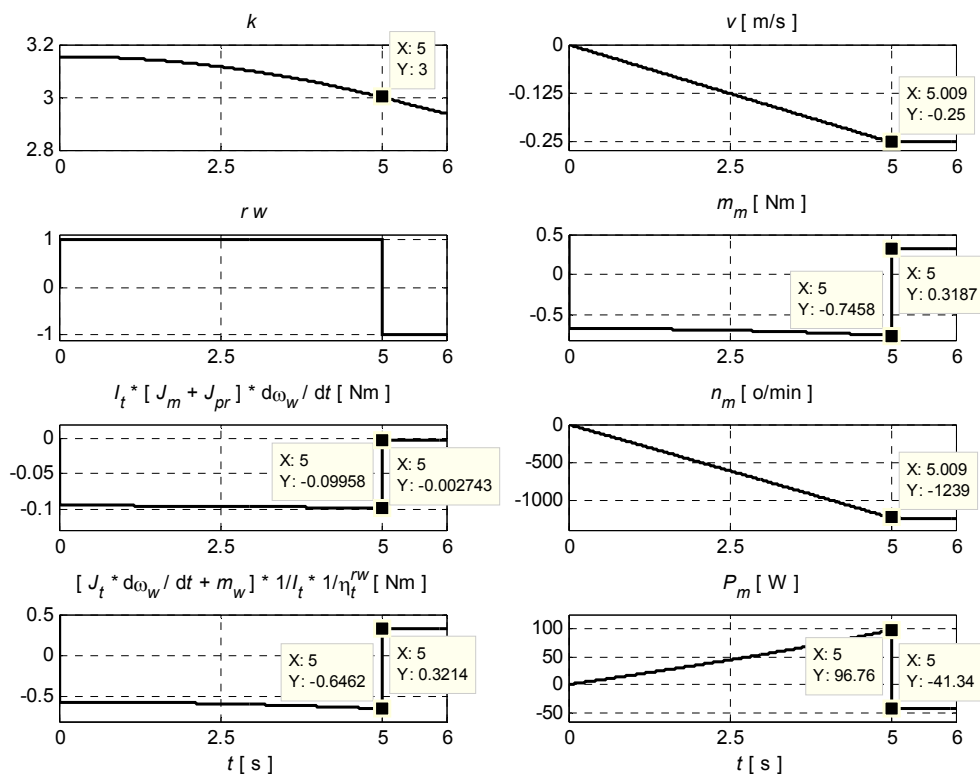
Analizom slika P4.1. do P4.8 jasno je da se maksimalno potrebna brzina motora očekuje u krajnje levom i krajnje desnom položaju kрана u odnosu na priključno mesto, odnosno na krajevima kranske staze, pri minimalnom broju namota kabla na kabl-bubnju, $k_{\min} = 3$, a pri maksimalnoj brzini kretanja kрана ($n_m = 1239$ o/min, slika P4.1; $n_m = -1239$ o/min, slika P4.3). Time je dokazano tvrđenje iz poglavlja 4.2 da je, u cilju izbora motora za pogon kabl-bubnja, što se tiče brzine, dovoljno sračunati maksimalno potrebnu brzinu motora na kraju kranske staze pri maksimalnoj brzini kretanja kрана (izraz 4.65).



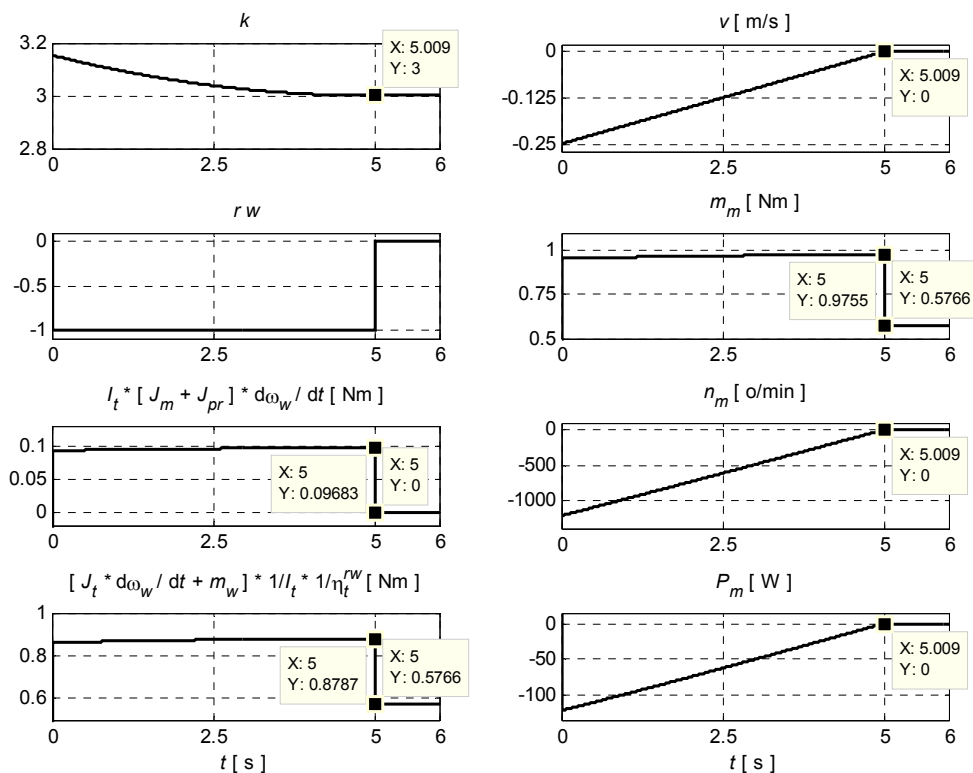
Slika P4.1. Režim rada: namotavanje kabla, zaletanje i konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 3$



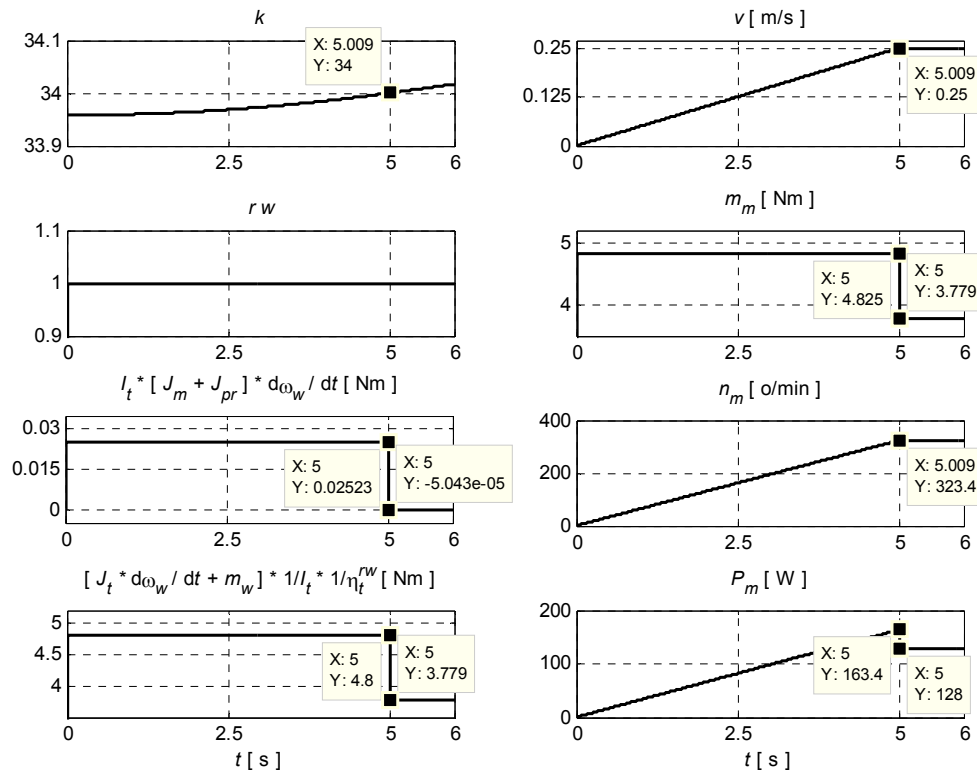
Slika P4.2. Režim rada: namotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 3$



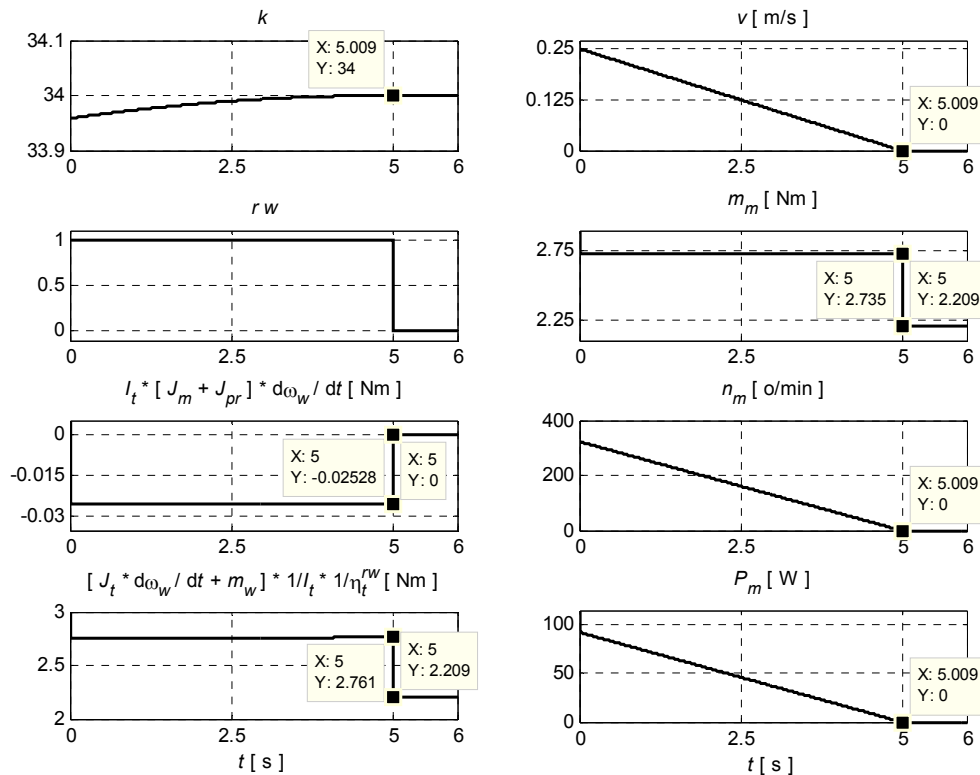
Slika P4.3. Režim rada: odmotavanje kabla, zaletanje i konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 3$



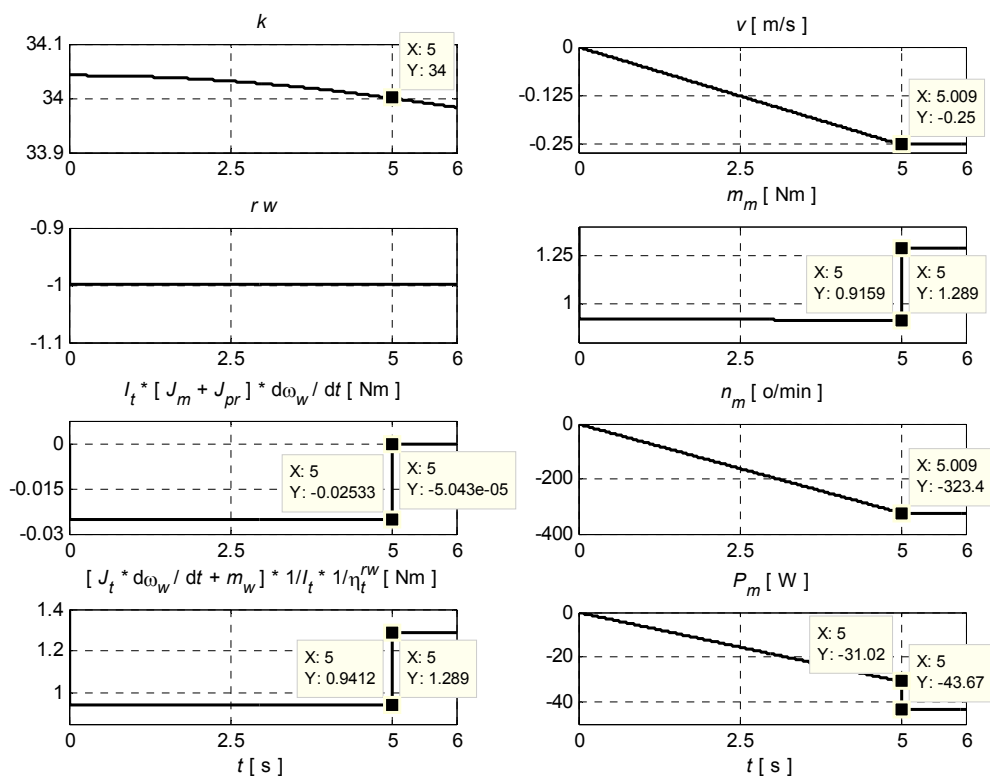
Slika P4.4. Režim rada: odmotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 3$



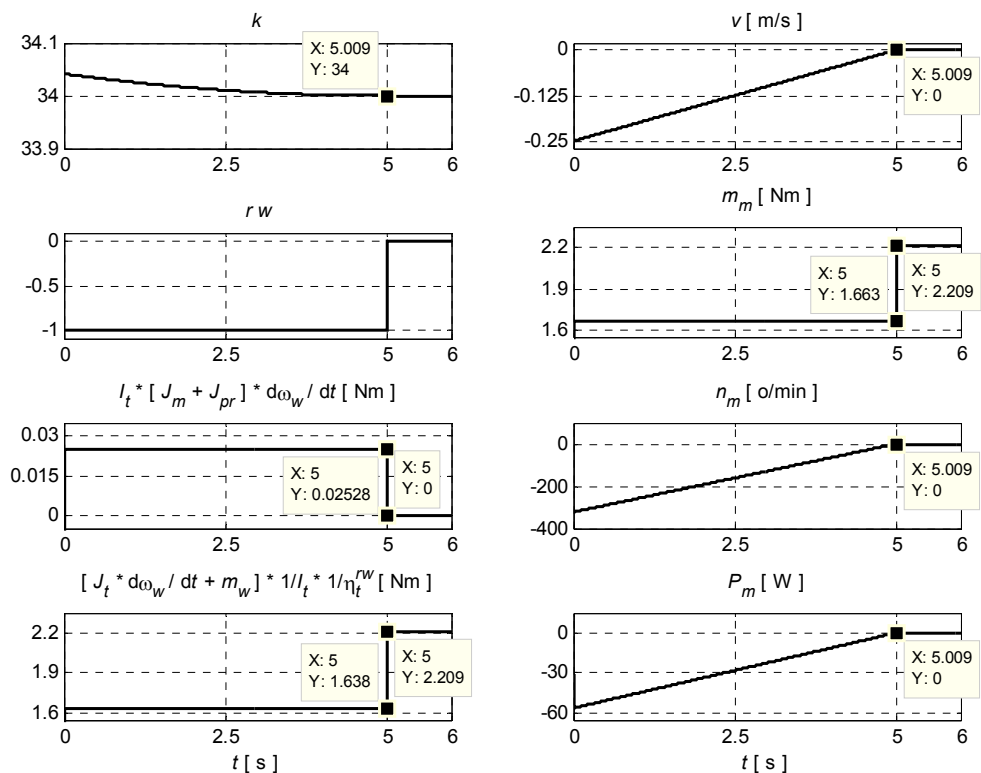
Slika P4.5. Režim rada: namotavanje kabla, zaletanje i konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 34$



Slika P4.6. Režim rada: namotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 34$



Slika P4.7. Režim rada: odmotavanje kabla, zaletanje i konstantna brzina kretanja kрана, $k \approx 34$

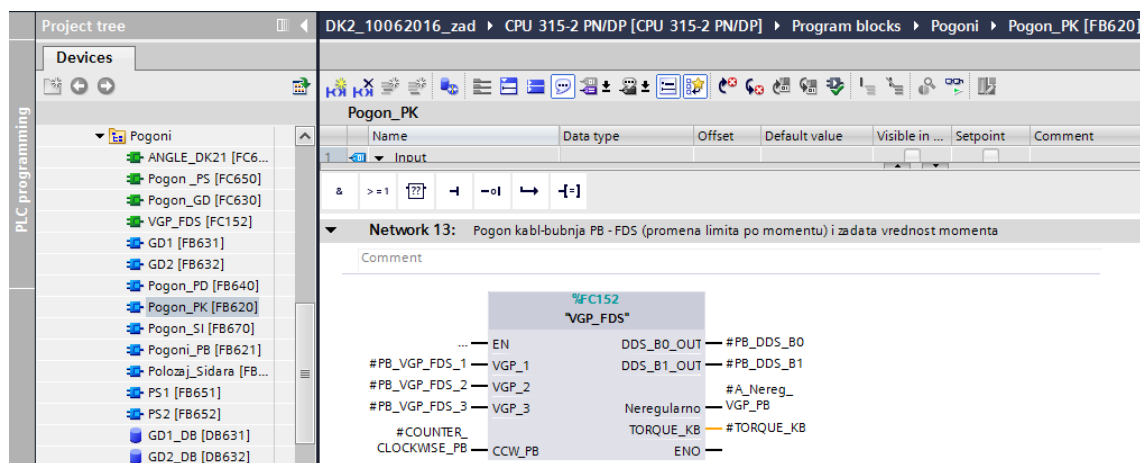


Slika P4.8. Režim rada: odmotavanje kabla, kočenje kрана, $k \approx 34$

Prilog 5

U ovom prilogu dat je deo PLC programa sa Derik kрана DK004, kojim se realizuje upravljanje pogonom kabl-bubnja primenom modifikovanog algoritma, čija je principijelna blok šema prikazana na slici 4.25. PLC program formiran je korišćenjem softvera “TIA Portal V13”, proizvođača Siemens.

Na slici P5.1 prikazana je PLC funkcija “VGP_FDS”, koja realizuje detekciju sektora kranske staze u kojem se kran nalazi i izbor zadate konstantne vrednosti momenta motora.



Slika P5.1. Funkcija za detekciju sektora kranske staze i za izbor zadatog momenta motora

Programske linije 1 i 2 PLC funkcije “VGP_FDS”, prikazane na slici P5.2, vrše detekciju sektora kranske staze u kojem se kran nalazi (“DDS_B0_OUT” i “DDS_B1_OUT”), a na osnovu signala sa vretenastog bregastog prekidača 9S1 (“VGP_1” do “VGP_3”). Navedene programske linije odgovaraju bloku “sektor” sa slike 4.25. Broj sektora dat je u binarnom obliku, na način pogodan da se direktno prosledi invertorskom modulu u cilju izbora odgovarajućeg podešenja (Drive Data Set) sa unapred definisanim graničnim vrednostima limitera (blok “limiter” sa slike 4.25). Imajući u vidu sliku 4.21, sektori su numerisani na sledeći način: sektor S1 sa “10”, sektor S2 sa “01” i sektor S3 sa “00”. U skladu sa analizom iz poglavlja 4.3, podela kranske staze na tri sektora realizovana je primenom dva brega, “VGP_1” i “VGP_2”, dok treći breg, “VGP_3”, pokriva celu kransku stazu i primenjen je u cilju povećanja sigurnosti.



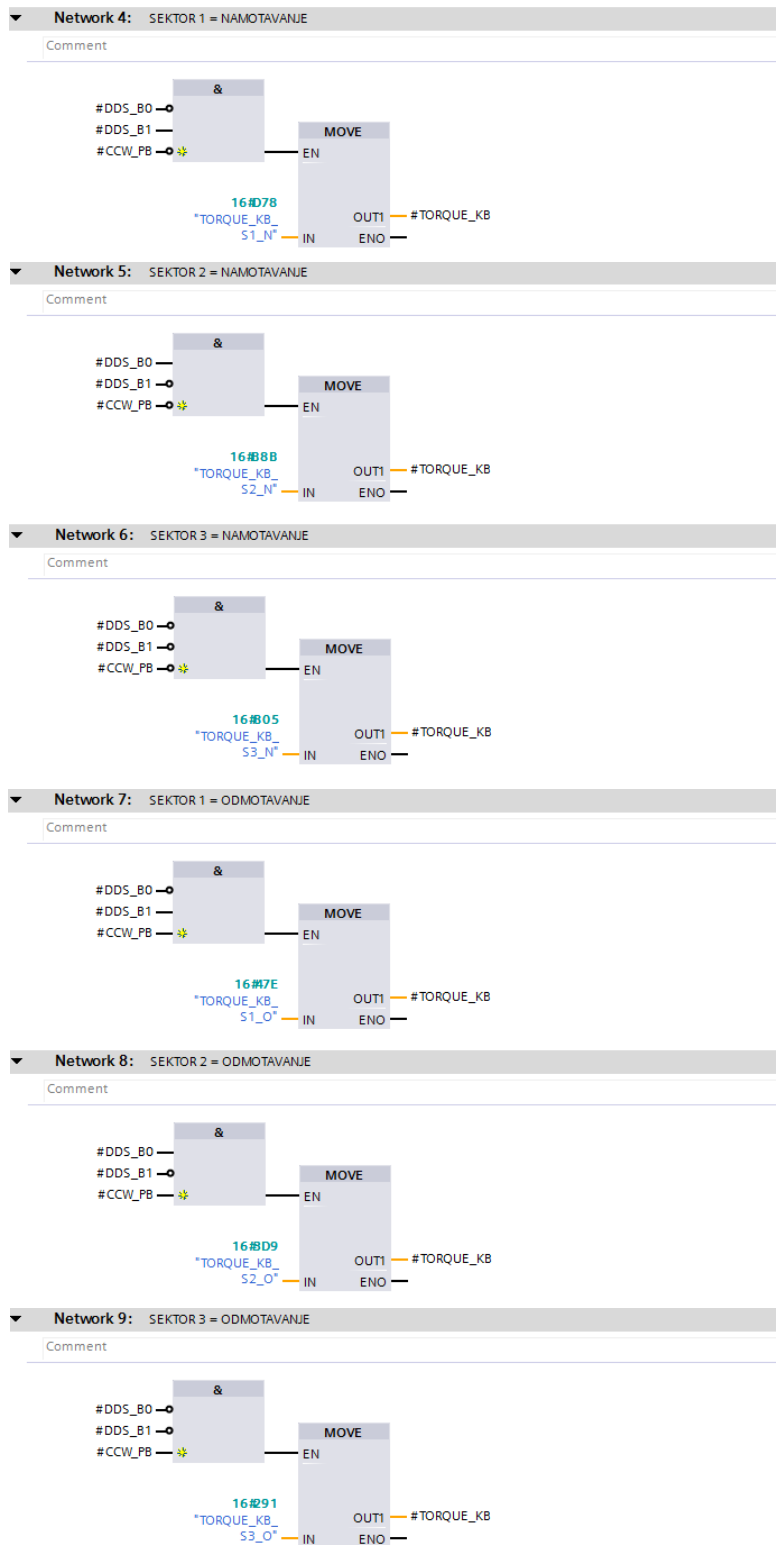
Slika P5.2. Programske linije za detekciju sektora kranske staze u kojem se kran nalazi

Programske linije 4 do 9 PLC funkcije “VGP_FDS”, prikazane na slici P5.3, vrše izbor zadate konstantne vrednosti momenta motora (“TORQUE_KB”), a na osnovu informacije o sektoru kranske staze u kojem se kran nalazi (“DDS_B0” i “DDS_B1”) i informacije o potrebi za namotavanjem/odmotavanjem kabla (“CCW_PB”). Navedene programske linije odgovaraju bloku “Tabela 4.7” sa slike 4.25. Zadana konstantna vrednost momenta motora data je u heksadecimalnom obliku, na način pogodan da se direktno prosledi invertorskom modulu.

Na slici P5.4 prikazana su PLC podešenja konstantnih vrednosti momenta motora za tri sektora kranske staze. Može se zaključiti da, u skladu sa analizom iz poglavlja 4.3, date vrednosti odgovaraju vrednostima iz tabele 4.7.

Konverzija vrednosti iz tabele 4.7, koje su date u dekadnom obliku, u heksadecimalni oblik, pogodan da se direktno prosledi invertorskom modulu, urađena je u skladu sa uputstvom za invertorski modul serije SINAMICS S120, proizvođača Siemens. Konverzija se vrši primenom linearne interpolacije, a uvažavanjem činjenice da se odgovarajućoj referentnoj vrednosti reference dodeljuje vrednost 16384 u dekadnom obliku, odnosno 4000 u heksadecimalnom obliku. Referentne vrednosti referenci u konkretnom slučaju, preuzete iz invertorskog modula softverom “Drive ES – Starter” proizvođača Siemens, date su na slici P5.5.

Programska linija 14, prikazana na slici P5.6, detektuje potrebu za namotavanjem/odmotavanjem kabla, odnosno određuje smer obrtanja kabl-bubnja (“COUNTER_CLOCKWISE_PB”), između ostalog, na osnovu informacija o položaju upravljačkog uređaja za pogon kretanja (“INF_PogKret_DESNO”) i položaju kрана u odnosu na priključno mesto (“INF_PrMesto_LEVO_Kran”). Navedena programska linija u skladu je sa analizom iz poglavlja 4.3 i slikom 4.19. Na slici P5.7 prikazana je programska linija 13, koja detektuje položaj upravljačkog uređaja za pogon kretanja (“INF_PogKret_DESNO”). Programska linija 8, prikazana na slici P5.8, detektuje položaj kрана u odnosu na priključno mesto (“INF_PrMesto_LEVO_Kran”), a na osnovu signala sa induktivnih davača 9S5 i 9S6 (“IGP_PrMesto_LEVO” i “IGP_PrMesto_DESNO”, respektivno). Programske linije 8, 13 i 14 odgovaraju bloku “namotavanje/odmotavanje” sa slike 4.25.



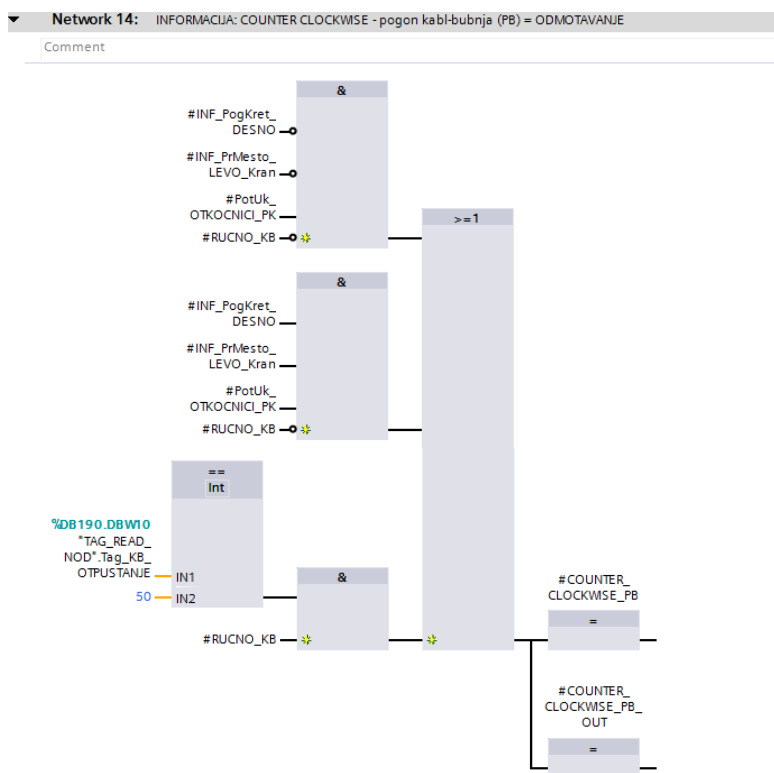
Slika P5.3. Programske linije za izbor zadate konstantne vrednosti momenta motora

13	TORQUE_KB_S1_N	Word	16#D78	KB = SEKTOR 1 = 4.2 Nm = namotavanje
14	TORQUE_KB_S2_N	Word	16#B8B	KB = SEKTOR 2 = 3.6 Nm = namotavanje
15	TORQUE_KB_S3_N	Word	16#805	KB = SEKTOR 3 = 2.5 Nm = namotavanje
19	TORQUE_KB_S1_O	Word	16#47E	KB = SEKTOR 1 = 1.4 Nm = odmotavanje
20	TORQUE_KB_S2_O	Word	16#3D9	KB = SEKTOR 2 = 1.2 Nm = odmotavanje
21	TORQUE_KB_S3_O	Word	16#291	KB = SEKTOR 3 = 0.8 Nm = odmotavanje

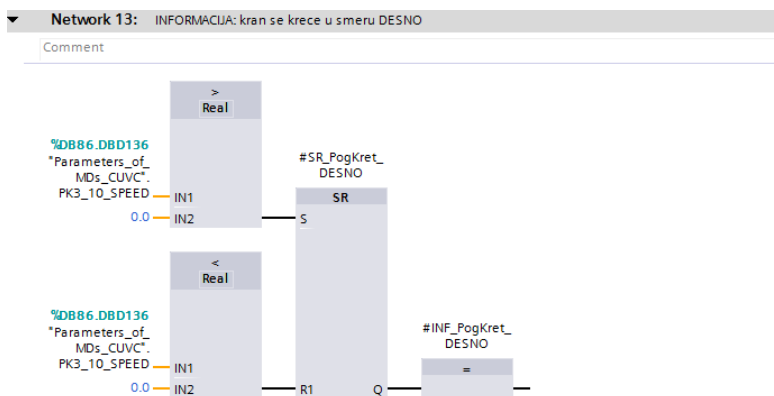
Slika P5.4. Konstantne vrednosti momenta motora za tri sektora kranske staze

805	p2000	Reference speed reference fr...	1500.00	rpm
806	p2001	Reference voltage	1000	Vrms
807	p2002	Reference current	4.95	Arms
808	p2003	Reference torque	19.96	Nm
809	r2004	Reference power	3.14	kW
810	p2005	Reference angle	90.00	°
811	p2006	Reference temp	100.00	°C
812	p2007	Reference acceleration	25.00	rev/...

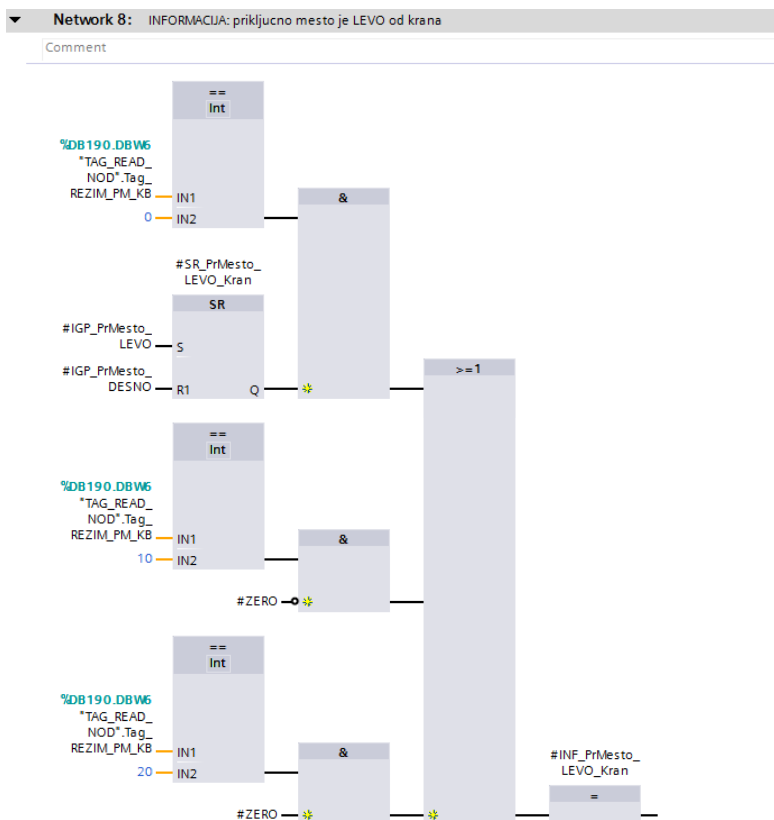
Slika P5.5. Referentne vrednosti referenci za invertorski modul



Slika P5.6. Programska linija za detekciju potrebe za namotavanjem/odmotavanjem kabla

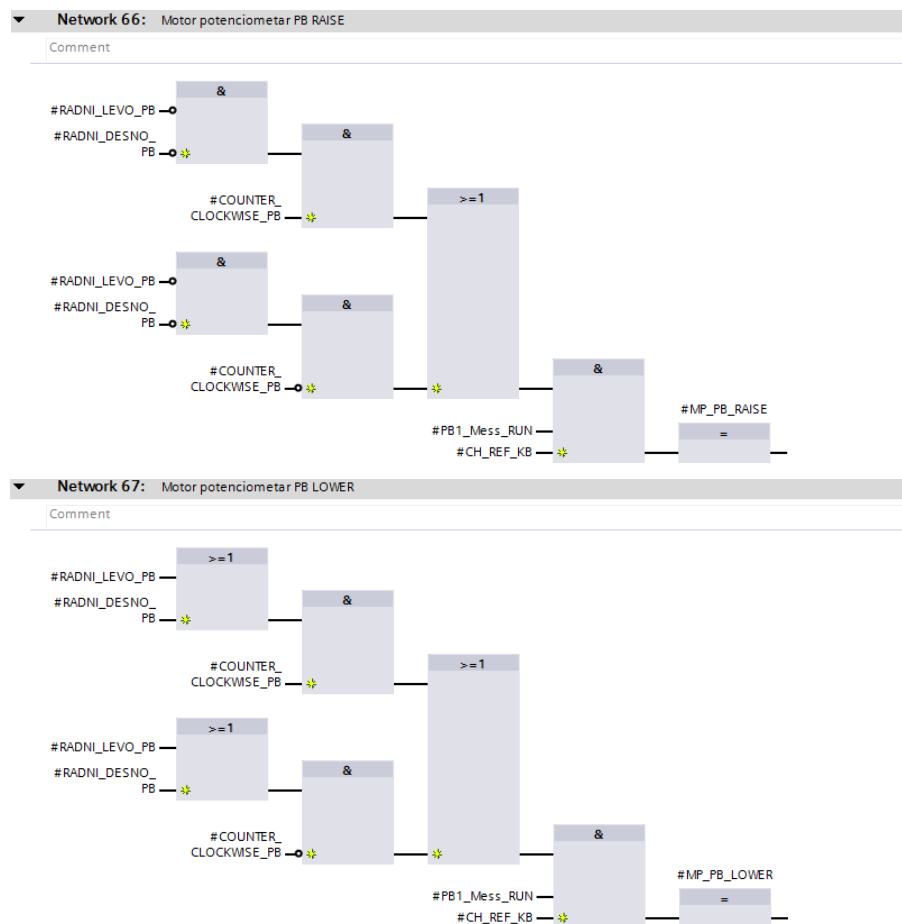


Slika P5.7. Programska linija za detekciju položaja upravljačkog uređaja za pogon kretanja



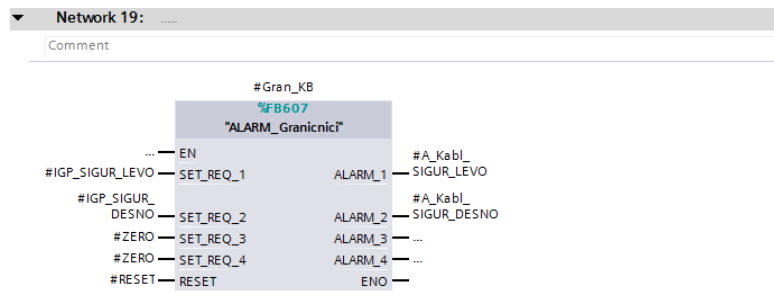
Slika P5.8. Programska linija za detekciju položaja kрана u odnosu na priključno mesto

Zadata konstantna vrednost momenta motora “TORQUE_KB” prosleđuje se invertorskom modulu, gde se, u skladu sa analizom iz poglavlja 4.3 i slikom 4.25, koriguje kompenzatorom poremećaja, a na osnovu stanja induktivnih davača 9S10 i 9S11. Kao kompenzator poremećaja iskorišćen je deo upravljačke strukture invertorskog modula “Motorized potentiometer”. Međutim, za razliku od slike 4.25, navedeni davači vezani su na PLC sistem, u kojem se vrši obrada njihovih signala. Programske linije 66 i 67, prikazane na slici P5.9, vrše obradu signala sa induktivnih davača 9S10 i 9S11 (“RADNI_DESNO_PB” i “RADNI_LEVO_PB”, respektivno), nakon čega se rezultati obrade “MP_PB_RAISE” i “MP_PB_LOWER” direktno prosleđuju invertorskom modulu.



Slika P5.9. Programske linije za obradu signala – kompenzator poremećaja

Na slici P5.10 prikazan je PLC funkcijski blok “Gran_KB”, koji realizuje zaštitu od pretezanja kabla. Ukoliko u bilo kom trenutku dođe do pretezanja kabla, što se detektuje na osnovu stanja polužnih davača 9S7 i 9S8 (“IGP_SIGUR_DESNO” i “IGP_SIGUR_LEVO”, respektivno), daju se signali za blokadu rada pogona kretanja i pogona kabl-bubnja, “A_Kabl_SIGUR_DESNO” i “A_Kabl_SIGUR_LEVO”. Ovaj funkcijski blok odgovara bloku “zaštita od pretezanja” sa slike 4.25.



Slika P5.10. Funkcijski blok za zaštitu od pretezanja kabla

Razmena podataka između PLC-a i invertorskog modula realizovana je industrijskom komunikacionom mrežom PROFINET. Na slici 2.19 prikazan je deo topologije komunikacionih mreža Derik kрана DK004.

Biografija autora

Vojkan Kostić rođen je 30.03.1975. godine u Svrlijigu, gde je završio osnovnu školu. Srednju elektrotehničku školu “Nikola Tesla” završio je u Nišu.

Diplomirao je na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu, na smeru Industrijska energetika, 2000. godine, sa prosečnom ocenom u toku studija 9,18 i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Na istom fakultetu magistrirao je 2007. godine, sa prosečnom ocenom 10. Magistarski rad pod nazivom “Analiza metoda za direktno upravljanje fluksom i momentom trofaznih asinhronih motora” odbranio je na Katedri za industrijsku energetiku. Doktorske akademske studije, na studijskom programu Elektrotehnika i računarstvo, izborno područje Elektroenergetika, upisao je 2008. godine.

U zvanje asistent-pripravnik na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu prvi put je izabran 2001. godine. Trenutno je zaposlen na istom fakultetu sa zvanjem asistent. U okviru nastavnog rada bio je angažovan na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi iz više predmeta: Elektromotorni pogoni, Odabrana poglavlja iz elektromotornih pogona, Transformatori...

Vojkan Kostić se u naučno-istraživačkom radu bavi elektromotornim pogonima i to unapređenjem algoritama upravljanja kod pogona naizmenične struje visokih performansi koji se napajaju pretvaračima frekvencije - vektorsko upravljanje i direktno upravljanje fluksom i momentom. U proteklom periodu bavio se i primenom regulisanih elektromotornih pogona u industriji mašina i opreme i procesnoj regulaciji. Posедуje značajno istraživačko iskustvo u modelovanju i ispitivanjima na simulacionom modelu, kao i u testiranjima na laboratorijskim prototipovima i u industrijskom okruženju.

Član je Inženjerske komore Srbije. Poseduje licence ministarstva nadležnog za poslove građevinarstva EI 05-01 (samostalno obavljanje stručnih poslova izrade, odnosno tehničke kontrole projekata elektroenergetskih instalacija niskog i srednjeg napona, upravljanja elektromotornim pogonima – automatika, merenja i regulacija i opreme koja utiče na osnovne zahteve za objekat, vršenja stručnog nadzora u toku građenja, kao i tehničkog pregleda) i EI 05-01.1 (obavljanje poslova rukovođenja izvođenjem radova elektroenergetskih instalacija niskog i srednjeg napona, upravljanja elektromotornim pogonima – automatika, merenja i regulacija i ugradnje opreme koja utiče na osnovne zahteve za objekat, vršenje stručnog nadzora u toku izvođenja, kao i tehničkog pregleda), čime je stekao profesionalni naziv licencirani inženjer elektrotehnike.

U svom dosadašnjem radu učestvovao je u realizaciji jednog međunarodnog projekta, 8 nacionalnih projekata i više projekata saradnje sa domaćim i inostranim privrednim subjektima. Autor/koautor je 86 naučnih i stručnih radova.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

РАЗВОЈ УНАПРЕЂЕНИХ УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ ПОГОНЕ КРАНОВА

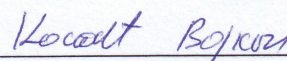
која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Војкан З. Костић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И
ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**РАЗВОЈ УНАПРЕЂЕНИХ УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА ЗА
ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ ПОГОНЕ КРАНОВА**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:

Војкан З. Костић

Војкан З. Костић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

РАЗВОЈ УНАПРЕЂЕНИХ УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ ПОГОНЕ КРАНОВА

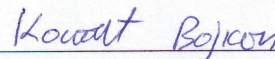
Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, _____.

Потпис аутора дисертације:



Војкан З. Костић