

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Leposava B. Ristić

**RAZVOJ ALGORITMA ZA POVEĆANJE
ENERGETSKE EFIKASNOSTI SISTEMA
TRAČNIH TRANSPORTERA NA
POVRŠINSKIM KOPOVIMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2012

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Leposava B. Ristić

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM
FOR ENERGY EFFICIENCY
IMPROVEMENT OF BELT CONVEYOR
SYSTEM ON OPEN PIT MINES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

Podaci o mentoru i članovima komisije:

Mentor:

Dr Borislav I. Jeftenić, dipl. ing. el, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

Dr Željko M. Đurović, dipl. ing. el, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

Dr Dragan M. Ignjatović, dipl. ing.rud, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Član komisije:

Dr Milan Z. Bebić, dipl.ing.el, docent
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

Dr Aleksandar B. Nikolić, dipl.ing.el, naučni saradnik
Elektrotehnički Institut Nikola Tesla

Datum odbrane:

RAZVOJ ALGORITMA ZA POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI SISTEMA TRAČNIH TRANSPORTERA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

Rezime

Potrošnja električne energije je u porastu zbog stalne potrebe za poboljšanjem kvaliteta života. Energetska efikasnost je danas jedan od ključnih elementa u energetske politici svih razvijenih zemalja sveta, jer doprinosi unapređenju ekonomije u celini, i produžava vek korišćenja neobnovljivih izvora energije, iz kojih se danas dobija najveći deo električne energije. U mnogim zemljama najveći deo električne energije dobija se iz uglja, npr. u Srbiji je 62% svih kapaciteta za proizvodnju električne energije je u termoelektranama na ugalj, a 65% proizvedene električne energije dobija se iz ovih elektrana. U narednim decenijama težište daljih povećanja kapaciteta za proizvodnju električne energije biće na termoelektranama, što će zahtevati povećanje proizvodnje uglja. Povećani zahtevi za proizvodnjom uglja vode ka povećanju količine uglja i jalovine koju treba transportovati u okviru rudnika sistemom tračnih transportera, zbog čega se povećava njihova dužina i kapacitet, a time i instalisana snaga njihovih pogona. Zbog značajnih snaga pogona i po pravilu 24-časovnog rada od posebnog interesa je unapređenje energetske efikasnosti tračnih transportera. U različitim granama industrije, u kojima se proizvodi ili koristi rastresiti materijal, za transport se koriste različiti tipovi tračnih transportera, sa različitim konstruktivnim i pogonskim karakteristikama. Bez obzira na vrstu i organizaciju površinskog kopa, elektromotorni pogoni na rudarskoj mehanizaciji zbog velikih snaga, složenosti rudarske opreme i vrlo teških uslova rada predstavljaju izazov za primenu savremenih metoda pokretanja i upravljanja, u cilju povećanja efikasnosti rada, kao i energetske efikasnosti. Kod konvencionalnih sistema transportera, rastresiti materijal se transportuje stalnom, nazivnom brzinom. Pri nazivnom kapacitetu sistema površina poprečnog preseka materijala na traci je optimalna (maksimalna), odnosno traka je maksimalno popunjena. Međutim, istraživanja i statističke analize pokazuju da ovakvi sistemi zbog tehnologije kopanja bagera vrlo retko rade sa punim kapacitetom, odnosno da se veliki deo radnog vremena na trakama nalazi manja količina materijala od maksimalno moguće, pa čak i da prazan hod čini značajan deo radnog vremena sistema. Potrebna snaga za pokretanje sistema traka zavisi od količine transportovanog materijala, ali i od brzine kretanja

traka. Imajući u vidu navedene činjenice, nameće se zaključak da je moguće transportovati materijal manjom brzinom od nazivne kada se na trakama nalazi manja količina materijala od maksimalno moguće, čime bi se smanjila trenutna snaga pogona, odnosno ostvarila značajna ušteda energije. Potrebna brzina kretanja traka se mora određivati u funkciji trenutne količine materijala na njima. Predmet ove doktorske disertacije je razvoj i primena algoritma za generisanje referentne brzine pojedinih transportera složenog sistema transportera. Na osnovu merenja površine poprečnog preseka materijala na ulazu u sistem tračnih transportera može se odrediti potrebna brzina kretanja traka koja će obezbediti stalnu optimalnu popunjenost svake trake u sistemu. Međutim, zbog značajnih varijacija količine dolazećeg materijala u sistem u vremenu ovakav način rada ne obezbeđuje energetski efikasan način rada, a i može dovesti do prekomernog habanja elemenata konstrukcije. Primenom različitih algoritama može se kontrolisati ubrzanje i usporenje trake, tako da se u okvirima ograničenja koja nameće sistem obezbedi minimalna potrošnja energije. U disertaciji su kombinovane teorijske, simulacione i eksperimentalne metode u cilju razvoja novog, originalnog algoritma kojim bi se ostvarilo povećanje energetske efikasnosti sistema, povećanje vremenskog i kapacitivnog iskorišćenja sistema, njegove pouzdanosti, produženje radnog veka opreme i smanjenje troškova održavanja. Pokazalo se da upravljanje primenom fazi logike predstavlja adekvatno rešenje, zbog svoje robusnosti i adaptivnosti, jednostavne primene i lakog podešavanja. Dokaz ispravnosti predložene ideje izveden je egzaktnim merenjima na postojećem postrojenju. Imajući u vidu navedene prednosti predloženog rešenja i dokazanu mogućnost uspešne primene, očekuje se da će se algoritam upravljanja sistemom tračnih transportera primeniti na sličnim postrojenjima u našoj zemlji, ali i u svetu, na površinskim kopovima sa kontinualnim načinom rada.

Ključne reči: *tračni transporteri, modelovanje, optimalno upravljanje, elektromotorni pogoni sa regulisanom brzinom, asinhroni motori, analiza i projektovanje sistema, rudarstvo, upravljanje na bazi fazi logike, SCADA sistemi*

Naučna oblast: Tehničke nauke - Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Energetski pretvarači i pogoni

UDK broj: 621.3

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF BELT CONVEYOR SYSTEM ON OPEN PIT MINES

Abstract

Electrical energy consumption is increasing globally in order to keep improving our quality of life. Energy efficiency is today one of the key elements in energy policy of all developed countries in the world, because it contributes to the improvement of economy globally and extends the lifetime of conventional energy sources, since the greatest part of total electrical energy is generated by fossil fuels. In many countries, most electrical energy comes from coal, for example in Serbia, 62% of all capacities for energy production is in thermal power plants which use coal, and they produce 65% of total electrical energy production. In the following decades, the focus will be on thermal power plants to further increase electrical energy capacities, requiring the rise of coal production. The growing demand for coal production leads to increased amounts of coal and overburden to be transported within the mine with belt conveyors systems. The length and the capacity are increasing causing the installed power of these systems to increase. Due to the large power of these drives and existing requirement for continuous operation, 24 hours per day, the improvement of energy efficiency of belt conveyors is naturally of significant interest. In various branches of industry where bulk materials are produced or used, various types of belt conveyors are used for the transport of materials, with different mechanical and drive characteristics. Despite of the type and the organization of the open pit mine, electrical drives on mining machines present a unique challenge to the application of modern techniques of driving and control, due to very large installed power, complexity of mining equipment and demanding environmental conditions, in order to increase the operational and energy efficiency. Conventional systems of conveyors transport bulk material at the constant, rated speed. When the system is at rated capacity, the cross section of material on the belt is at the maximum value, i.e. the belt is fully loaded. However, investigations and statistic analyses show that systems like this, due to technology of excavation very often work at reduced capacity. Most often the instantaneous cross section area of material on the belt is less than the rated value, and even no-load operation makes up a significant part of the system's operational time. The necessary power for driving the

system of belt conveyors depends on the quantity of transported material, as well as on the speed of the belts. Considering the aforementioned facts, the following conclusion can be made: since the belt conveyor often operates at a decreased capacity, the same quantity of material can be transferred at a lower than rated speed, leading to instantaneous power reduction, along with significant energy savings. The required speed of the belt must be determined as a function of the instantaneous quantity of material on the belt. The subject of this dissertation is the development and application of an algorithm for generating the reference speed of the belt conveyor drive in a complex system of belt conveyors. Based on measurements of instantaneous cross section area of material at the beginning of the system of belt conveyors, the required belt speed can be determined to provide that each belt in the system of belt conveyors will be constantly and optimally loaded. The instantaneous capacity changes quite frequently and sporadically, meaning that the speed should be increased and decreased in the same manner as the instantaneous capacity changes. These dynamic processes would be unfavorable for the mechanical assemblies of a belt conveyor, especially for the belt, and could lead to increased energy consumption. With the application of different control strategies, the acceleration and deceleration of a belt can be controlled in order to ensure minimum energy consumption under the existing technical constraints of the system. The dissertation combines theoretical, simulation and experimental methods, with the goal of developing a new, original algorithm to improve the energy efficiency of the system, capacitive utilization of the system, system reliability, extension of the service life of the equipment and reduction of costs for system maintenance. During the development of the control strategy, fuzzy logic control appeared to be a suitable solution for improving the energy efficiency of the system, due to its robust and adaptive characteristics, simple implementation and appropriate tuning procedure. The validation of the proposed idea is achieved through experimental results recorded on an existing system of belt conveyors in an open pit mine. Considering the indicated advantages of the proposed algorithm, as well as the proven opportunity of its successful implementation, it is expected that the algorithm for generating speed reference of the system of belt conveyors will be applied on similar systems in our country, as well as abroad, in open pit mines with continuous mining.

Key words: *Conveyors, Modeling, Optimal control, Adjustable speed drives, Induction motors, System analysis and design, Mining industry, Fuzzy logic control, SCADA systems*

Scientific field: Technical sciences - Electrical engineering

Specific scientific field: Power converters and drives

UDC number: 621.3

Sadržaj

I. Uvod	1
I.1. Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom	6
I.2. Pregled literature	12
II. Tračni transporter kao deo jalovinskog sistema	18
II.1. Tračni transporteri	20
II.2. Sistem tračnih transportera	24
II.3. Pogon tračnog transportera	26
II.3.1. Osnovne karakteristike pogona tračnog transportera	26
II.3.2. Pregled postojećih vrsta pogona tračnog transportera	27
II.3.3. Upoređenje klasičnih pogona i pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača na tračnom transporteru	33
II.3.4. Upravljanje pogonom tračnog transportera sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača	41
II.3.5. Osnovi proračuna tračnih transportera	44
II.3.5.1. Otpori kretanja i potrebna snaga u ustaljenom radu	44
II.3.5.2. Otpori kretanja i vučna sila u nestacionarnim režimima rada	51
II.3.6. Osnovni principi projektovanja tračnih transportera	53
III. Matematički model trake	61
III.1. Dinamički model trake	61
III.2. Dinamički model tračnog transportera u MATLAB <i>Simulink</i> -u i njegova verifikacija pomoću rezultata merenja na terenu	72
IV. Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera	79
IV.1. Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja	79
IV.1.1. Modifikovani algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja	85

IV.1.2. Optimalna vrednost koeficijenta usporenja	92
IV.2. Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera razvijen na bazi fazi logike.....	95
IV.3. Komparativna analiza prikazanih algoritama sa stanovišta ostvarenih ušteda energije	104
V. Primena analiziranih algoritama za generisanje referentne brzine na realnom sistemu tračnih transporetra.....	108
V.1. Primenjeni pogon na tračnim transporterima V BTO sistema.....	108
V.1.1. Pogon tračnog transporter sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača	109
V.1.1.1. Asinhroni motori.....	109
V.1.1.1. Frekventni pretvarači	110
V.2. Upravljanje pogonom pojedinačnih tračnih transporter a i sistemom u celini .	116
V.3. Kontrolni centar	124
V.4. Analiza rezultata merenja	128
V.4.1. Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporter a sa konstantnim koeficijentom usporenja.....	128
V.4.2. Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporter a na bazi fazi logike	133
V.5. Analitička verifikacija izabranog rešenja u pogledu smanjenja potrošnje energije	138
V.6. Neka praktična iskustva iz rada sistema tračnih transporter a sa promenljivom brzinom.....	148
VI. Zaključak	150
SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE:	154
Biografija autora.....	160

Spisak oznaka korišćenih u radu

Simboli

Q	Kapacitet
$A(t)$	Površina trenutnog poprečnog preseka materijala na referentnom mestu
$v(t)$	Trenutna brzina trake
T	Posmatrani period
T_{sin}	Perioda sinusoide
T_s	Vreme (perioda) odabiranja
M	Masa
F	Sila
g	Ubrzanje sile zemljine teže
f	Koeficijent trenja
M_b	Ekvivalentna masa trake
M_{bm}	Masa materijala na traci
m_m	Moment opterećenja
m_e	Elektromagnetni moment motora
J	Moment inercije
P	Snaga
W	Specifična utrošena električna energija - utrošena električna energiju po kubnom metru transportovanog materijala [kWh/m ³]
k	Koeficijent usporenja pogona tračnog transportera
V	Zapremina
L	Dužina trake
L_{ps}	Dužina trake koja odgovara jednom memorijskom registru

R	Broj registara
\mathbb{N}	Skup prirodnih brojeva
γ	Specifična masa materijala
c	Recipročna vrednost vremenske konstante integratora u algoritmu za generisanje referentne brzine (dimenzija izražena u $[s^{-1}]$)

Indeksi

n	Nazivna vrednost
sr	Srednja vrednost
ph	Prazan hod
ref	Referentna vrednost
ul	Ulazni
iz	Izlazni
$const$	Konstantna vrednost
t	Teorijska vrednost
sin	Sinusoida

Skraćenice

PK	Površinski kop
TT	Tračni transporter
PLC	Programabilni logički kontroler (Programmable Logic Controller)
$SCADA$	Supervisory Control and Data Acquisition
DTC	Direktna kontrola momenta (Direct Torque Control)
BTO	Bager-Tračni transporter-Odlagač
AM	Asinhroni motor

I. Uvod

Potrošnja električne energije je globalno u porastu zbog stalne potrebe za poboljšanjem kvaliteta života. Prema podacima koji su dostupni u literaturi [1] oko 87% ukupne energije se dobija iz fosilnih goriva, od čega je 28% iz uglja. Povećani zahtevi za proizvodnjom uglja vode ka povećanju količine uglja i jalovine koju treba transportovati u okviru rudnika sistemom tračnih transportera, zbog čega se povećava njihova dužina i kapacitet, a time i instalisana snaga njihovih pogona. Zbog značajnih snaga pogona i po pravilu 24-časovnog rada od posebnog interesa je unapređenje energetske efikasnosti tračnih transportera. Procenjuje se da se poboljšanjem energetske efikasnosti primenom savremenih tehnologija može uštedeti 20% od ukupnih svetskih potreba, a da se drugih 20% može uštedeti sprečavanjem gubitaka snage, tj. različitim metodama koje se zasnivaju na zakonu o održanju energije [1]. U cilju da se odrede i analiziraju sve ovakve mogućnosti, proces upravljanja energijom mora da obuhvati inženjering, projektovanje, primenu, rad i održavanje elektroenergetskih sistema [2].

Jedan od ključnih elemenata za uštedu energije i porast produktivnosti u industriji su pogoni sa promenljivom brzinom (*Adjustable Speed Drives*) [3]. Za praktičnu primenu u industriji, razvijene su različite tehnike upravljanja pogonima sa mašinama za naizmeničnu struju sa dobrim dinamičkim karakteristikama, što je izazvalo njihovu ubranu primenu [4]. Veliki uticaj razvoja energetske elektronike, koji se širio u svim oblastima industrije, postao je neizbežan i u ukupnoj automatizaciji industrije, povećanju energetske efikasnosti tehnoloških procesa, kao i u savremenoj tehnologiji za kontrolu zagađenosti čovekove sredine [5], [6]. U skladu sa tim, energetske pretvarači sa više nivoa (*multilevel power converters*) dobijaju značajnu ulogu u aplikacijama sa većom instalisanom snagom na višim naponskim nivoima [7], [8], [9], kao i višefazni energetske pretvarači [10], za višefazne mašine [11], sa povećanim stepenom korisnog dejstva, pouzdanošću i redundansom. Posebna pažnja je posvećena tipovima, konstrukciji, karakteristikama, primeni, dimenzionisanju i iskorišćenju električnih motora [12], jer oni čine oko 70% ukupne potrošnje energije [2]. Prema literaturi [13], pogoni sa trofaznim asinhronim motorima čine više od 60% ukupne potrošnje električne energije u industriji, zbog čega su značajni naponi uloženi u

povećanje njihove energetske efikasnosti primenom različitih tehnika optimizacije [14], [15], ili upotrebom visoko kvalitetnih materijala i detaljnom procedurom projektovanja u procesu proizvodnje [16].

Tračni transporter je jedan od ključnih elemenata u raznim procesnim sistemima, kao i u većini proizvodnih procesa [17]. U različitim granama industrije gde se proizvodi ili koristi rastresiti materijal, za transport materijala se koriste tračni transporteri različitih tipova, sa različitim konstrukcijama i sistemima pokretanja. Karakteristično mesto primene tračnih transportera su rudnici, naročito rudnici sa površinskom eksploatacijom. U rudnicima sa površinskom eksploatacijom postoje dva načina kopanja:

- diskontinualno (ciklično) kopanje, gde se za kopanje koriste bageri sa jednim radnim elementom [18], kašikom koja može biti kruto povezana sa bagerom (bager sa čeonom - visinskom kašikom, bager sa obrnutom - dubinskom kašikom, bager sa kašikom za struganje - vager strug i dr.) [19] ili elastično (bager sa povlačnom - dreglajnskom kašikom, bager sa kašikom grabilicom - grejfer, bager sa kukom za dizanje i premeštanje tereta - kran, i dr.) [18], [20], a transport materijala se vrši kamionima [21]. Ovaj način kopanja je karakterističan za rudnike manjeg kapaciteta, i za rudnike gde je materijal koji se otkopava veće tvrdoće. U poslednjih nekoliko godina značajni istraživački naporu su bili usmereni ka poboljšanju performansi opreme i mehanizacije u rudarstvu zahvaljujući tehnološkom napretku u oblasti pogona i upravljanja pogonima [19], [20], [21], [22].
- kontinualno kopanje, gde se za kopanje koriste bageri sa više radnih elemenata (ostvaruju neprekidno otkopavanje stenske mase pomoću većeg broja vedrica koje su ravnomerno raspoređene na beskonačnom lancu (vedričar) ili na rotornom točku (rotorni bager) [18]), a za transport iskopanog materijala se isključivo koriste tračni transporteri velikog kapaciteta. Ovaj način kopanja je uobičajen za velike površinske kopove, u kojima se najčešće kopa ugalj za potrebe termoelektrana. Mehanizacija u ovakvim rudnicima je organizovana u sisteme, kao što su BTO (bager - tračni transporteri - odlagač) za kopanje otkrivke (jalovine) ili BTD (bager - tračni transporteri - drobilana), odnosno BTU (bager - tračni transporteri - utovar) za kopanje uglja.

Bez obzira na tip i organizaciju površinskog kopa, zbog velikih instalisanih snaga, složenosti rudarske opreme i vrlo teških uslova rada, rudarska industrija predstavlja izazov za primenu savremenih metoda pokretanja i upravljanja, u cilju povećanja efikasnosti rada, kao i energetske efikasnosti [22].

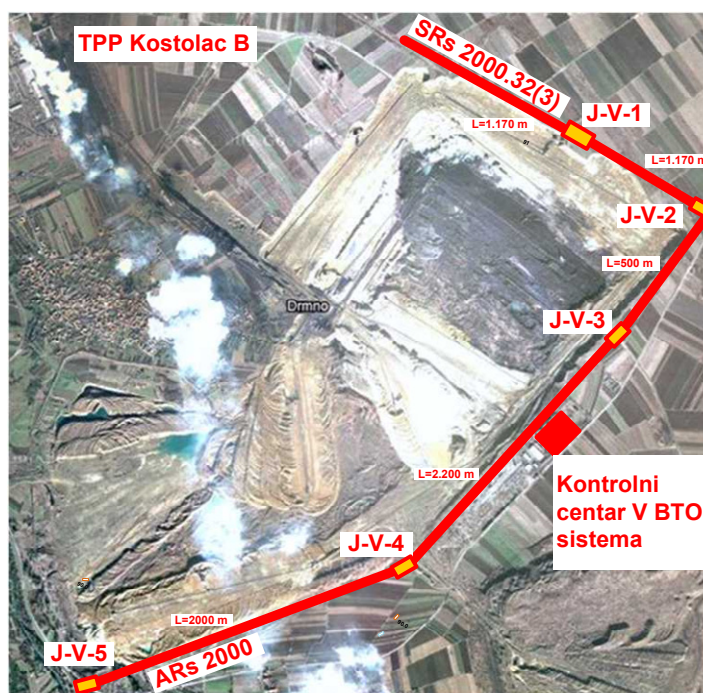
U novije vreme grade se vrlo dugački tračni transporteri sa dužinama od nekoliko desetina kilometara. Zbog velike dužine trase ili zbog potrebe da se promeni njen pravac usled važećih tehnoloških zahteva, formira se duž trase sistem od nekoliko tračnih transporterera, odnosno pogonskih stanica tračnih transporterera. Pogonske stanice tračnih transporterera su postavljene duž planirane trase, tako da se celom trasom materijal transportuje sa jedne trake na drugu, sve do krajnjeg odredišta. Instalಿಸana snaga ovih tračnih transporterera je velika, tako da se svakom racionalizacijom potrošnje energije mogu ostvariti značajne uštede. Zbog dužine ovih tračnih transporterera posebno su zahtevni procesi pokretanja, u toku koga pogon mora da razvije potreban, ali stalan moment u toku vremena polaska. Navedeni zahtevi mogu da se ostvare sa pogonima koji omogućavaju kontinualnu kontrolu brzine, zbog čega se novi pogoni na tračnim transporterima grade sa pogonima sa asinhronim motorima čija se brzina može kontrolisati [23].

U postrojenjima i sistemima gde se koriste tračni transporteri, njihova instalಿಸana snaga skoro uvek predstavlja značajni deo ukupne instalಿಸane snage, što znači da je njihova potrošnja dominantna u ukupnoj potrošnji energije. Zbog toga je problem uštede energije u slučaju tračnih transporterera od posebnog značaja za korisnika datog postrojenja, odnosno sistema [23], [24], [25].

Na površinskom kopu „Drmno” realizovan je novi V BTO sistem, koji se sastoji od bagera SRs2000, odlagača ARs2000 i sistema od pet tračnih transporterera maksimalne dužine 3,25 km po transporteru, širine gumene trake 2000mm, kapaciteta 6600 m³/h i instalಿಸana snaga 20 MW (Sl. I.1).

Svaki tračni transporter se sastoji od pogonske stanice, realizovane sa regulisanim pogonom sa asinhronim motorima (4×1 MW po tračnom transporteru). Laboratorija za elektromotorne pogone Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je aktivno učestvovala u realizaciji projekta sistema tračnih transporterera od samog početka, zbog čega se, pored ostalog, ukazala prilika da se u projektu realizuje i ideja

energetski efikasnog transporta otkrivke na bazi regulacije brzine transporta, čime je ostvaren jedan nov način rada ovakvih sistema.



Sl. I.1 Sistem tračnih transporterera V BTO sistema na površinskom kopu „Drmno”, Kostolac (rotorni bager, pet tračnih transporterera i odlagač)

U doktorskoj disertaciji istraživane su mogućnosti da se poveća energetska efikasnost sistema tračnih transporterera regulacijom brzine transporta, na principu maksimalnog iskorišćenja površine poprečnog preseka materijala na traci pri važećim ograničenjima sistema. Zbog svoje veličine i dužine, ovakvi sistemi zahtevaju veoma složenu komunikacionu strukturu za razmenu informacija između svih pogonskih stanica tračnih transporterera, između pogonskih stanica tračnih transporterera i bagera, kao i odlagača. Svi industrijski pogoni koji se danas proizvode podržavaju različite komunikacione protokole. Korišćenjem komunikacionih protokola u upravljačkom sistemu značajno se pojednostavljuje hardverska realizacija i omogućava se primena ovih pogona u mrežno upravljanim sistemima [26], [27]. Moderni tračni transportereri su visoko sofisticirani sistemi, koji mogu da budu realizovani sa daljinskim upravljanjem iz kontrolnog centra površinskog kopa. Daljinsko upravljanje omogućava potpuno iskorišćenje naprednih opcija u savremenoj tehnologiji u pogledu povećanja nivoa sigurnosti, pouzdanosti i produktivnosti. Realizacijom daljinskog upravljanja ostvaruje

se mogućnost da ceo sistem tračnih transporterera radi sa povećanom energetsom efikasnošću.

Doktorska disertacija je organizovana u šest poglavlja. U prvom poglavlju, koje predstavlja uvod, dat je pregled literature iz oblasti aktuelnih načina upravljanja koja se koriste u svetu i kod nas na sličnim sistemima, a u cilju povećanja ušteta sa aspekta energije, kao i ekonomije, s obzirom na postojeću tarifnu politiku.

U drugom poglavlju je dat prikaz tračnog transporterera kao dela jalovinskog sistema. Opisane su vrste tračnih transporterera i karakteristike sistema tračnih transporterera. Takođe su opisani i osnovni tipovi pogona tračnih transporterera, kao i uporedna analiza njihovih karakteristika. Posebna pažnja je posvećena višemotornim pogonima tračnih transporterera sa kavezim asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača i njihovom načinu upravljanja. Date su osnove proračuna i projektovanja tračnih transporterera.

U trećem poglavlju je dat detaljan matematički model analiziranog tračnog transporterera. Takođe je prikazan detaljan dinamički model višemotornog pogona tračnog transporterera i njegova implementacija u MATLAB *Simulink*-u.

Razvoj algoritma za regulaciju brzine sistema tračnih transporterera je predmet četvrtog poglavlja. Na simulacionom modelu sistema transporterera izvršena je analiza mogućnosti i performansi algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterera sa konstantnim koeficijentom usporenja, koji u okvirima ograničenja koja nameće sistem obezbeđuje smanjenu potrošnju energije. Na bazi uočenih karakteristika, analizirane su druge mogućnosti za generisanje referentne brzine sistema transporterera koji bi poboljšao performanse sistema, a pre svega obezbedio veću energetsom efikasnost. U ovoj tezi razvijen je originalni algoritam na bazi fazi logike, koji predstavlja novo rešenje za povećanje energetske efikasnosti sistema, što je glavni doprinos doktorske teze. Na osnovu uporedne analize rezultata dobijenih za različite upravljačke algoritme, izabrano je rešenja kojim se postižu najveće uštete energije.

Eksperimentalni rezultati snimljeni na sistemu od pet tračnih transporterera na površinskom kopu prikazani su u petom poglavlju. Polazeći od činjenice da je postojeći BTO sistem realizovan sa daljinskim upravljanjem, u PLC-u koji se nalazi u kontrolnom centru površinskog kopa implementirana su dva osnovna načina rada sistema tračnih transporterera: rad sa konstantnom brzinom i rad sa promenljivom brzinom u funkciji

trenutnog kapaciteta. Eksperimentalno su ispitana i proverena dva algoritma za određivanje promenljive brzine transportera. Kod prvog algoritma povećanje brzine se vrši srazmerno povećanju trenutne količine materijala na traci, dok se smanjenje brzine vrši sa unapred definisanim koeficijentom usporenja, a kod drugog se koristi nov predloženi način određivanja brzine transportera primenom fazi logike. Na osnovu rezultata prikupljenih u dužem vremenskom periodu, pokazano je da predloženi algoritam na bazi fazi logike daje bolje rezultate u pogledu uštede električne energije, tj. energetske efikasnosti, a u okviru ograničenja koja su nametnuta konstruktivnim i tehnološkim karakteristikama sistema. Analitička verifikacija predloženog algoritma izvršena je poređenjem sa rezultatima dobijenim za optimalnu brzinu tračnog transportera minimizacijom funkcije ulazne snage pogona tračnog transportera, sa uvažavanjem poznatih ograničenja sistema. Potvrđena je ispravnost predloženog rešenja upravljanja brzinom sistema tračnih transportera u cilju povećanja energetske efikasnosti sistema pod postojećim konstruktivnim karakteristikama sistema, tj. maksimalne popunjenosti trake, minimalne brzine tračnog transportera i maksimalno prihvatljivog usporenja pogona. Sve navedene tvrdnje su proverene u praktičnoj aplikaciji predloženog algoritma u komercijalnom postrojenju, koje radi 24 sata dnevno, 365 dana godišnje.

I.1. Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom

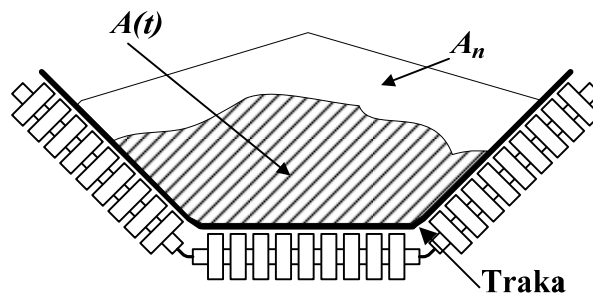
Rastresiti materijal koji se transportuje tračnim transporterom može biti raspoređen po dužini trake na različite načine u zavisnosti od toga kako se materijal deponije na traku. Količina materijala koja se prenese u jedinici vremena, odnosno kapacitet, može se izraziti opštom formulom:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot v(t) dt . \quad (1.1)$$

Nazivni kapacitet Q_n tračnog transportera je:

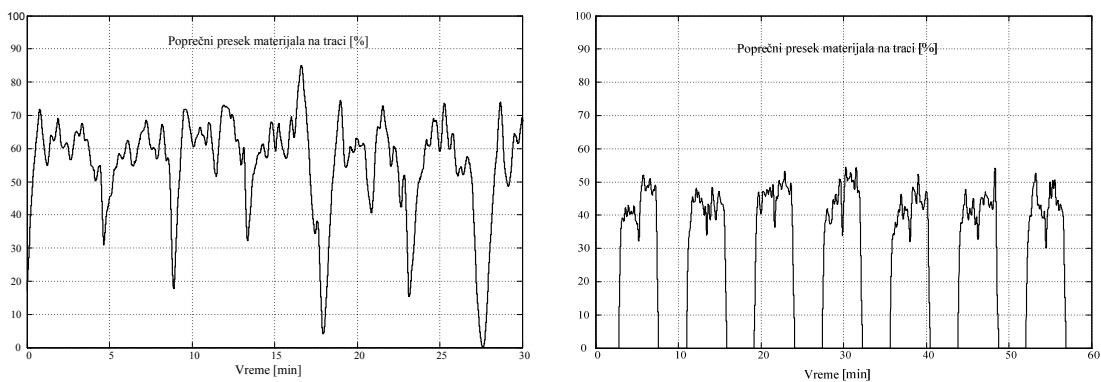
$$Q_n = A_n \cdot v_n \quad (1.2)$$

Grafički prikaz površine poprečnog materijala na traci prikazan je na slici Sl. I.2.



Sl. I.2 Površina poprečnog preseka materijala na traci

Trenutna količina rastresitog materijala koja se transportuje pomoću tračnog transportera zavisi od režima rada sistema u okviru koga se koristi tračni transporter. U velikom broju slučajeva ova količina je promenljiva, i najčešće je površina trenutnog poprečnog preseka materijala na traci manja od nazivne. Tipičan primer su tračni transporteri na površinskim kopovima. Na Sl. I.3 prikazan je snimljeni dijagram površine trenutnog poprečnog preseka materijala na početku jednog tračnog transportera, koji je u sastavu BTO sistema na površinskom kopu. Periodičnost koja se može uočiti na slikama je posledica načina rada rotornog bagera. Na obe slike se vidi da je površina trenutnog poprečnog preseka materijala na traci manja od nazivne vrednosti (100%), i da se u pojedinim periodima na traku i ne deponuje materijal.



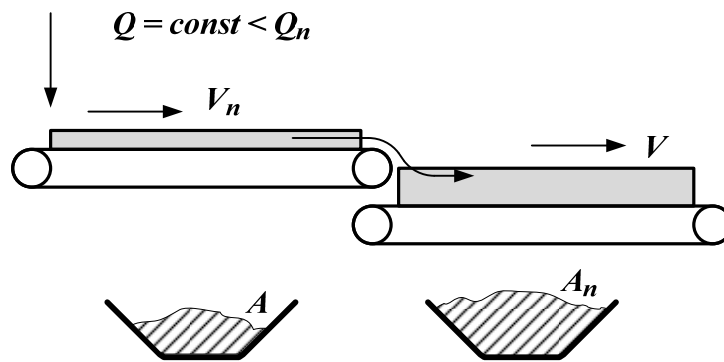
Sl. I.3 Snimljene trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala koja se deponuje na tračni transporter na površinskom kopu

Na bazi merenja koja su vršena u dužem vremenskom intervalu na površinskom kopu „Drmno” u Kostolcu, Srbija, konstatovano je da je najveći deo vremena količina materijala na traci oko 50% nazivnog [28]. Značajan deo vremena traka se kreće bez materijala, dok je vreme rada sa potpunim iskorišćenim vrlo kratko. Na Sl. I.5 su prikazani rezultati dobijeni na osnovu merenja u periodu od tri meseca, na

sistemu sa godišnjim vremenskim iskorišćenjem od 5000h. Slični rezultati dobijeni su ranije i na kopovima u Nemačkoj [25], [29], [30].

Činjenica da tračni transporter često radi sa smanjenim kapacitetom, odnosno da je površina poprečnog preseka materijala manja od nazivne, navodi na zaključak da se ista količina materijala, odnosno isti kapacitet može preneti na dva načina, sa stalnom brzinom a manje ispunjenim poprečnim presekom materijala na traci, ili sa stalno potpuno iskorišćenom površinom poprečnog preseka materijala, ali brzinom manjom od nazivne, kao što je prikazano jednačinom (1.3) i na Sl. I.4.

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot v_n dt = \frac{1}{T} \int_0^T A_n \cdot v(t) dt \quad (1.3)$$



Sl. I.4 Dva tračna transportera u nizu
površina poprečnog preseka materijala na traci

Pokazano je da je u praksi najčešće $A(t) < A_n$, pa prema (1.3) sledi $v(t) < v_n$. Što znači da ako bi se brzina menjala prema relaciji (1.4), tračni transporter bi mogao da radi sa manjom brzinom od nazivne.

$$v(t) = \frac{A(t)}{A_n} v_n \quad (1.4)$$

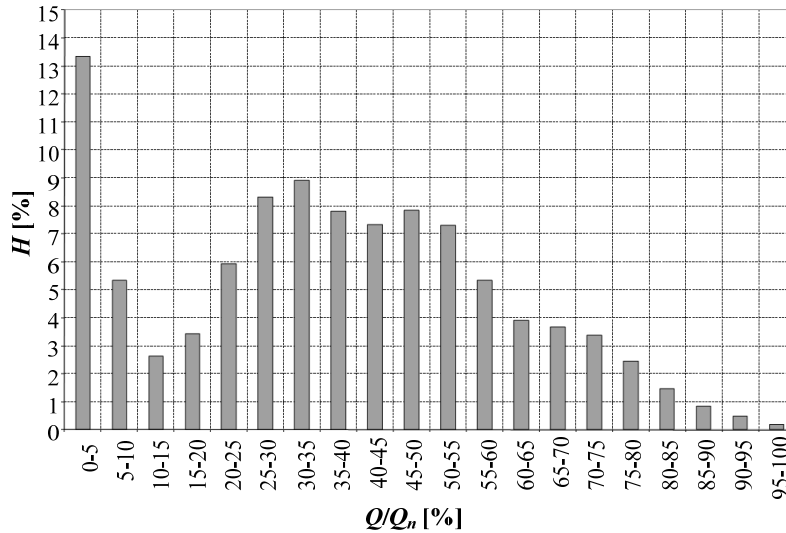
Transport materijala manjom brzinom od nazivne bi svakako mogao da utiče na smanjenje energije potrebne za vršenje transporta. Potrebna sila F za transport količine materijala mase M je:

$$F(v) = M \cdot g \cdot f(v) \quad (1.5)$$

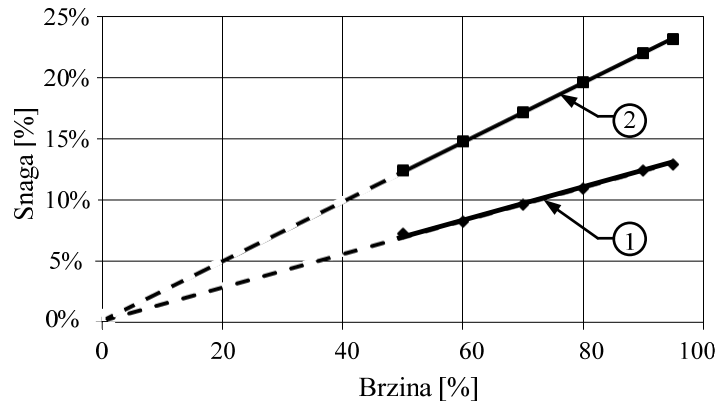
Trenje je u opštem slučaju funkcija brzine. Zavisnost trenja od brzine zavisi od vrste otpora kretanja, odnosno od konstrukcije transportnog uređaja, u posmatranom slučaju od tračnog transportera. Da bi se utvrdila ova zavisnost može se izmeriti snaga

za pokretanje praznog tračnog transportera, P_{ph} stalnom brzinom v , a koja se može izraziti pomoću (1.6),

$$P_{ph}(v) = M_b \cdot g \cdot f(v) \cdot v. \quad (1.6)$$



Sl. I.5 Raspedela vremena u funkciji kapaciteta



Sl. I.6 Snaga praznog hoda pogona trake u funkcij brzine, dužine tračnih transportera 1-849m, 2-2050m

Na Sl. I.6 prikazani su rezultati merenja snage na dva tračna transportera pri različitim brzinama, kada na njima nije bilo materijala. Instalirana snaga pogona je $4 \times 1\text{MW}$, širina trake 2000mm, a dužine tračnih transportera su različite. Na Sl. I.6 prikazana je snaga praznog hoda u procentima od instalirane snage, a u funkciji brzine u [%] u odnosu na nazivnu brzinu trake. Snage u opsegu brzina od 50 do 100% su se razlikovale za 6 do 12% instalirane snage u zavisnosti od dužine tračnog transportera. Zavisnost snage praznog hoda od brzine na Sl. I.6 je praktično linearna, što znači da trenje ne zavisi od brzine. To se moglo očekivati, jer je maksimalna brzina relativno

mala 5,8 m/s, svi ležajevi na tračnom transporteru su kotrljajući, i u vreme kada su merenja vršena oprema je bila sasvim nova. Potrebna snaga za pokretanje tračnog transportera dužine L , pod pretpostavkom da je površina poprečnog preseka materijala na traci ista po celoj dužini tračnog transportera, da je brzina stalna, i da trenje ne zavisi od brzine je:

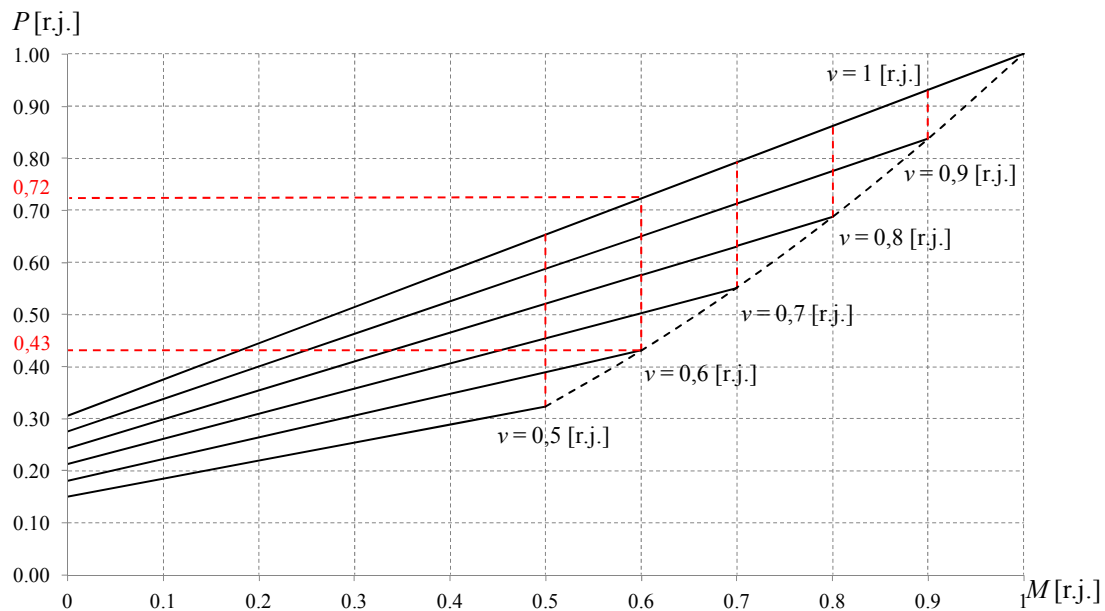
$$\begin{aligned}
 P &= (M_{bm} + M_b) \cdot g \cdot f \cdot v = (A \cdot L \cdot \gamma + M_b) \cdot g \cdot f \cdot v \\
 &= \underbrace{(A \cdot v)}_{const} \cdot L \cdot \gamma \cdot g \cdot f + M_b \cdot g \cdot f \cdot v
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

U skladu sa održanjem kapaciteta i u skladu sa promenom brzine druge trake u nizu prema izrazu (1.4), prvi sabirak u (1.7) koji odgovara potrebnoj snazi za transport materijala je konstantan. Drugi sabirak odgovara snazi potrebnoj za savlađivanje otpora kretanja prazne trake i zavisi od brzine, kako je pokazano pomoću rezultata merenja na Sl. I.6. Prema tome, ako se brzina podesi prema (1.4), za transport određene količine materijala ostvariće se ušteda energije, na osnovu smanjenja snage potrebne za kretanje trake.

Da se snaga potrebna za transport iste količine materijala smanjuje sa smanjenjem brzine trake, može se potvrditi i analizom karakteristika prikazanih na Sl. I.7. Na slici su prikazane zavisnosti potrebne snage pogona od mase materijala na traci za različite brzine transporta, dobijene na osnovu analitičkog matematičkog modela tračnog transportera. Prikazani rezultati su u potpunoj saglasnosti sa rezultatima dobijenim merenjem [25]. Tako na primer, masa od 0,6 [r.j.] se može transportovati angažovanjem snage od 0,72 [r.j.] pri nazivnoj brzini trake, ali i sa snagom od 0,42 [r.j.], ako se brzina podesi na 0,6 [r.j.], pri čemu su relativne jedinice izražene u odnosu na nazivne vrednosti.

Izvedena teorijska analiza, podržana izvršenim eksperimentima sa praznom trakom i simulacijama na modelu tračnog transportera, potvrđuje očekivane rezultate u pogledu smanjenja energije potrebne za transport rastresitog materijala. Međutim, zbog složenosti mehanike kretanja trake pod opterećenjem, treba očekivati uticaj tereta na povećanje koeficijenta trenja što može umanjiti efekat smanjenja snage sa smanjenjem brzine. Takođe, činjenica da je materijal po dužini trake neravnomerno raspoređen može uticati na snagu pogona. Od posebnog značaja je činjenica da iz praktičnih razloga, nije moguće stalno održavati brzinu tračnog transportera prema relaciji (1.4). Pošto ove

efekte nije moguće precizno definisati, dalji teorijski proračuni nisu opravdani, već se konačan sud o uštedi energije može dati samo na osnovu merenja potrebne energije u dužem vremenskom periodu.



Sl. I.7 Zavisnosti potrebne snage pogona od mase za različite brzine transporta (rezultati dobijeni dobijeni na osnovu analitičkog matematičkog modela tračnog transportera)

I.2. Pregled literature

Pored prisustva velikog broja radova iz oblasti dinamičkih modela tračnih transporterera [31], [32], [33], [34], [35] koji služe za monitoring i simulaciju rada, kao i za proučavanje tranzijentnih pojava, najčešće sila zatezanja u trakama, analiza literature je pokazala prisustvo takođe značajnog broja radova koji se uglavnom fokusiraju na energetske efikasnost tračnih transporterera na nivou rada i na nivou opreme.

Tračni transporter predstavlja tipični sistem koji vrši elektromehaničko pretvaranje energije, usled čega se mogu postići poboljšanja energetske efikasnosti na četiri nivoa: na nivou performansi, rada, opreme i tehnologije [36]. **Efikasnost tehnologije** predstavlja meru efikasnosti konverzije energije, obrade, prenosa i načina upotrebe, i često je ograničena prirodnim zakonima, kao što je zakon održanja energije. Ocenjuje se najčešće na osnovu pokazatelja kao što su izvodljivost, ukupna cena i povratak investicija, a okarakterisana je svojom savremenošću i optimalnošću. **Efikasnost opreme** se ocenjuje na osnovu pokazatelja kao što su instalisana snaga, tehničke karakteristike i standardi, ograničenja i održavanje. Glavni zadatak povećanja efikasnosti opreme se sastoji u minimizaciji odstupanja parametara primenjene opreme od projektovanih vrednosti. **Efikasnost rada** se odnosi na funkcionisanje sistema kao celine, a ocenjuje se na osnovu koordinisanosti rada između komponenti sistema koje su svrstane u tri kategorije, fizičku, vremensku i ljudsku komponentu. **Efikasnost performansi** jednog energetskog sistema se određuje na osnovu tačno definisanih spoljnih pokazatelja, kao što su produktivnost, cena proizvoda, korišćeni izvori energije, uticaj na čovekovu okolinu, kao i tehnički pokazatelji. Između navedena četiri nivoa ne postoje tačno određene granice, već se oni međusobno prožimaju.

Konstrukcija i izbor opreme sistema tračnih transporterera, u slučaju veoma dugih trasa, koje na pojedinim deonicama prelaze i preko velikih vodenih površina, razmatrane su u [37], [38]. Na novim ili revitalizovanim tračnim transporterima uglavnom se koristi visoko efikasna oprema, pri čemu je akcenat stavljen na noseće rolne, trake i elektromotorne pogone. U [39], [40], [41] je razmatrano šta sve utiče na efikasnost nosećih rolni, počevši od njihove konstrukcije, delova, lubrikacije, zaptivenosti ležajeva i održavanja. Visoko efikasne trake dobijene su poboljšanjem strukture i gumenih delova, a predstavljene su u [42]. Analize i istraživanja u oblasti pogona tračnih transporterera pokazali su da postoji više razloga da se za pogon trake

koriste pogoni kod kojih se može regulisati brzina [43], [44], [45] mada postoje i suprotna mišljenja [46]. Pregled prednosti koje se ostvaruju primenom ovakvih predloga je sledeći [28], [47].

- Pogoni kod kojih se može regulisati brzina omogućavaju promenu brzine kod pokretanja i zaustavljanja sa unapred definisanim ubrzanjem, odnosno usporenjem, a takav način pokretanja je pogodan za motor i mehaničke delove pogona. Kod pogona tračnih transporterata ovakav način pokretanja ima poseban značaj, imajući u vidu da su trake elastične. Trake imaju značajna istezanja, a samim tim i skupljanja po dužini, iz dva glavna razloga, zbog svoje dužine i materijala od koga su napravljene. Pokretanjem tračnih transporterata sa ubrzanjem prilagođenim njihovim karakteristikama, obezbeđuje se polazak bez oscilacija momenta i nepotrebnih naprezanja svih elemenata, a naročito trake. Isto važi i za procese usporenja i zaustavljanja.
- Promena brzine u funkciji trenutnog kapaciteta po pravilu rezultira čestim periodima rada sa manjom brzinom od projektovane, što dovodi do uštede energije.
- Istovremeno rad sa nižim brzinama od nazivne doprinosi manjem habanju elemenata, a time i produženju veka trajanja postrojenja.
- Smanjenje dinamičkih naprezanja kod promene brzine, i polaska, kao i smanjenje habanja doprinosi smanjenju broja zastoja usled otkaza opreme, odnosno povećanju vremenskog iskorišćenja postrojenja.
- Podešavanje brzine pojedinih motora kod višemotornog pogona tračnog transporterata omogućava raspodelu opterećenja srazmerno nazivnim snagama motora.
- Kontrolom brzine, odnosno njenim kratkotrajnim smanjenjem, može se eliminisati proklizavanje trake na pogonskom bubnju.

Međutim, i pored svih navedenih prednosti, sadašnja implementacija pogona sa promenljivom brzinom se fokusira uglavnom na niži nivo upravljanja i na pojedinačne tračne transporterate [44], [48] najčešće ne razmatrajući upravljanje na nivou sistema, sa svim ograničenjima, sistemskim i spoljnim.

Upravljanje brzinom sistema tračnih transporterata u cilju povećanja njegove energetske efikasnosti je princip upravljanja koji je široko prihvaćen u industriji i sa

uspehom primenjen u nekoliko slučajeva sistema tračnih transportera [25], [30], [38], [48], [49], [50]. Međutim, analiza ovih radova, kao i ostale raspoložive literature i dokumentacije, pokazuje da je ova tema u najvećem broju slučajeva obrađena na nivou informacije, što ukazuje na zaključak da velike firme koje se bave projektovanjem pogona tračnih transportera i njihovim upravljanjem na nivou sistema, nemaju interes da prikažu detaljno primenjene algoritme.

Izuzetak predstavljaju dva rada, [25] i [51], koja su nastala u vremenskom razmaku od 11 godina i koja datom problemu pristupaju na dva različita načina. Analiza ovih radova biće izložena u nastavku teksta, ali i pored toga, može se smatrati da do sada nisu dovoljno istražene i prikazane mogućnosti upravljanja brzinom sistema tračnih transportera sa ciljem povećanja njegove energetske efikasnosti u celini.

Prvi put je šira teorijska analiza upravljanja brzinom na nivou sistema tračnih transportera, zajedno sa eksperimentalnom verifikacijom data u [25]. Izgrađen je potpuno nov sistem tračnih transportera na površinskom kopu Nochten u Nemačkoj, kako bi se direktno pomoću njega novoizgrađeni blok termoelektrane Boxberg snabdevao ugljem. Kako se radi o potpuno novom sistemu, realizacija je ostvarena sa daljinskim upravljanjem iz kontrolnog centra i primenom visoko efikasne opreme, čime je sa aspekta opreme i tehnologije postignuto maksimalno povećanje energetske efikasnosti sistema. Primenom upravljanja referentnom brzinom sistema tračnih transportera u funkciji kapaciteta materijala koji se transportuje, tako da se postojeća površina poprečnog preseka materijala iskoristi u najvećem mogućem stepenu, postignuto je povećanje energetske efikasnosti sistema sa aspekta upravljanja. Autor je u radu obrazložio teorijske osnove na osnovu kojih se smanjenjem brzine ostvaruje smanjenje ulazne snage, što je kasnije merenjima na sistemu i potvrdio. U samom radu, autor se nije bavio detaljima primenjenog algoritma kojim se upravlja referentnom brzinom sistema tračnih transportera u opsegu od $0,5 v_n$ do v_n . Iz prikazanih rezultata merenja na realnom sistemu, može se zaključiti da se referentna brzina linearno menja, pri čemu je apsolutna vrednost konstantnog koeficijenta usporenja manja nego apsolutna vrednost konstantnog koeficijenta ubrzanja. Na taj način se postiže do 25 upravljačkih akcija promene brzine u toku jednog sata rada sistema tračnih transportera, čime se štiti oprema, pre svega mehanički sklopovi i trake. Autor naglašava da se na ovaj način ne može postići konstantno maksimalna popunjenost trake, a što je

odstupanje popunjenosti trake u svakom trenutku u odnosu na maksimalnu popunjenost veće, ostvaruju se manje uštede energije. Na osnovu analize rezultata merenja snage u dužem vremenskom periodu, autor rada zaključuje da se mogu ostvariti uštede energije u iznosu od 20% i u daljem toku rada se bavi analizom ostvarenih ušteda, njihovim svrstavanjem u odgovarajuće kategorije, kao i određivanjem procentualnog učešća svake pojedinačne kategorije u ukupnoj vrednosti ostvarene uštede energije.

Radu [51], prethodio je dugi niz godina rada grupe autora sa Univerziteta Pretoria iz Južnoafričke republike i Wuhan Univerziteta iz Kine u oblasti regulacije elektromotornih pogona tračnih transportera, iz koga su proizašla dva rada [52] i [53]. U [52], autori se bave formiranjem optimalnog modela upravljanja sistemom tračnih transportera za transport uglja u jednom rudniku u Južnoafričkoj republici. Kao ulazna promenljiva kriterijumske funkcije koristi se tarifni sistem za električnu energiju u cilju dobijanja optimalnog rešenja kojim se minimiziraju troškovi za utrošenu električnu energiju, maksimalnim korišćenjem mogućnosti premeštanja proizvodnje u periode kada su najmanji zahtevi za električnom energijom, što je adekvatno favorizovano postojećim tarifnim sistemom. Problem je rešavan korišćenjem funkcije *bintprog* iz programskog paketa MATLAB *Optimization Toolbox*-a [54] (*bintprog* - *binary integer programming* - funkcija kojom se primenjuje algoritam na bazi linearnog programiranja da bi se odredio minimum kriterijumske funkcije pod određenim ograničenjima, pri čemu je rešenje vektor koji uzima vrednost 0 ili 1), pri svim prisutnim ograničenjima koja nameće realni sistem, a praktično se svodi na uključenje, odnosno isključenje odgovarajućih tračnih transportera, u sistemu koji ima najveći udeo u potrošnji električne energije. Rešenjem, koje je dobijeno simulacijom, autori tvrde da se za pet radnih dana ostvaruju uštede u iznosu od 49% u novčanim sredstvima koja se izdvajaju za plaćanje utrošene električne energije, kao i da se preraspodelom opterećenja smanjuje potrošnja u periodu vršnih opterećenja sa 25% na 8%. Autori rada sugerišu implementaciju dobijenih rezultata na realnom sistemu, kao i na svim sličnim sistemima u posmatranom rudniku i šire.

Kako se povećanje energetske efikasnosti sistema tračnih transportera može ostvariti na 4 nivoa - na nivou performansi, rada, opreme i tehnologije, u radu [53] autori su se fokusirali, na kako smatraju, najpraktičniji deo, tj. na povećanje efikasnosti rada. Optimalnu strategiju upravljanja, kojom se ostvaruje optimalno vreme za

uključenje, odnosno isključenje jednog sistema tračnih transportera iz procesa transporta uglja sa skladišta, preko drobilane u bunkere, proširili su sa optimalnim upravljanjem brzinom svakog pojedinačnog tračnog transportera u cilju povećanja energetske efikasnosti celog sistema. Prva optimalna strategija integriše cenu električne energije u posmatranom vremenskom periodu prema aktuelnom tarifnom sistemu i radni status (uključen/isključen) posmatranog sistema tračnih transportera u kriterijumsku funkciju, uzimajući u razmatranje uticaj drugih sistema, kao i realna ograničenja sistema, a kao rezultat se dobija optimalna koordinacija rada datog sistema tračnih transportera u vremenu. U slučaju optimalnog upravljanja brzinom tračnog transportera, kriterijumska funkcija uključuje u sebe izraz za izračunavanje utrošene električne energije tračnog transportera u zavisnosti od ulaznog kapaciteta materijala i brzine kojom se kreće traka, zatim, granične vrednosti za izvod brzine u vremenu pri linearnoj promeni brzine trake u periodima ubrzanja, odnosno usporenja, i cenu električne energije u vremenskim periodima kada traka radi. Rezultati su dobijeni simulacijom, korišćenjem funkcija *bintprog* i *fmincon* iz programskog paketa MATLAB *Optimization Toolbox*-a [54] (*fmincon* - *finds a minimum of constrained nonlinear multivariable function* - funkcija koja se bazira na SQP algoritmu (*Sequential Quadratic Programming* - *sekvencijalno kvadratno programiranje*) za nalaženje minimuma nelinearne kriterijumske funkcije više promenljivih pod definisanim ograničenjima, u slučaju jednog realnog sistema, čiji su svi parametri poznati.

U radu [51], autori su detaljno prikazali način dobijanja izraza za ulaznu električnu snagu pogona tračnog transportera, na osnovu koga su sproveli proces optimizacije sa ciljem poboljšanja energetske i radne efikasnosti. Prvo je predstavljen analitički opisan tzv. „energetski model”, koji je potekao iz standarda ISO 5048, i kojim se svi parametri sistema svode na 4 koeficijenta. Uporedo je sprovedena i „*off-line*” i „*on-line*” estimacija parametara, kako bi se identifikovala nepoznata 4 koeficijenta „energetskog modela” datog sistema, a zatim je sprovedena optimizacija u cilju dobijanja najefikasnijeg rada tračnog transportera. U okviru rada su formulisana 4 tipična optimizaciona problema za slučaj tračnog transportera, sa rešenjem kroz simulacije.

Prema viđenju autora u [51], postoji više načina da se oformi „energetski model” pogonskog dela tračnog transportera, ali se oni mogu svrstati u dve osnovne

grupe: prvu grupu čine oni koji imaju svoje poreklo u standardima i specifikacijama kao što su ISO 5458, DIN 22101 [55] i CEMA [56], a drugu, oni koji se baziraju na elektromehaničkoj konverziji energije, metodologiji na kojoj su bazirani JIS B 8805 i Goodyear [57] modeli. Modeli iz prve grupe se formiraju tako da koriste izraze u kojima je većina konstanti koje se koriste za proračun potrošnje tračnih transportera određena empirijski, zbog čega su ovi modeli pogodni za proračun pri izboru tračnih transportera za konkretnu primenu, ali ne i za optimalni proračun. Postojeći „energetski modeli” su uglavnom rađeni prema konstruktivnim karakteristikama, a većina tračnih transportera ne radi prema njima (mnogi se veći deo vremena kreću prazni). Sa druge strane, u slučaju pravog „energetskog modela” koji bi bio pogodan za svrhu optimizacije, morala bi da postoji mogućnost da se njegovi parametri estimiraju na osnovu merenja izvršenih na terenu, umesto da se određuju samo putem proračuna.

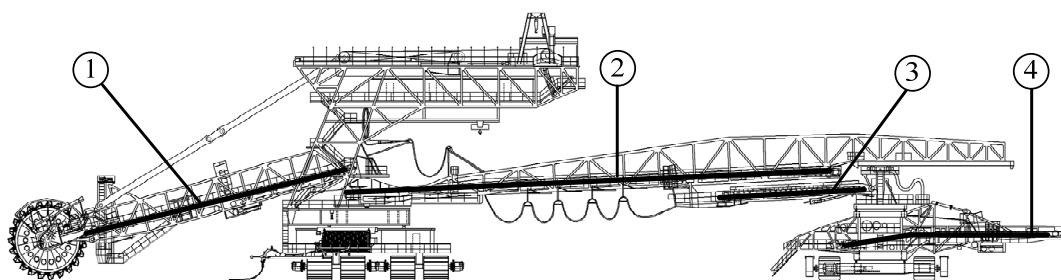
Ipak, modeli koji se zasnivaju na proračunu otpora kretanja, tj. na navedenim standardima, smatraju se tačnijim, jer uzimaju u obzir sve ono što može uticati na potrošnju energije. U skladu sa tim, ove modele čine komplikovane jednačine, sa puno parametara i detalja. Sa druge strane modeli koji se baziraju na pretvaranju energije, pojednostavljaju proračun uvođenjem konstante L_0 . Ova konstanta predstavlja konstantnu dužinu pomoću koje se u modelu izračunavaju sve sile usled otpora kretanja koji su posledica nekog oblika trenja, a koje ne zavise od dužine trake. Zato što ovi modeli koriste jednu ili nekoliko konstanti da kompenzuju sve slučajeve, smatraju se manje tačnim. Takođe, svi ovi modeli, i oni koji se zasnivaju na proračunu otpora kretanja, kao i oni koji se zasnivaju na pretvaranju energije, koriste konstruktivne parametre kako bi odredili snagu tračnog transportera. Njihovom primenom u praksi, stvara se velika razlika između energije koja se meri i one koja se dobija proračunom, zato što se stvarni uslovi rada u mnogome razlikuju od projektom predviđenih.

Radovi [25] i [51] su imali vrlo važnu ulogu u razvoju ove doktorske teze. Metodologija koja je izložena u [25] poslužila je kao osnova za razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja, dok je metodologija izložena u [51] iskorišćena kao još jedan način, pored rezultata dobijenih merenjem na realnom sistemu, da se proveriti i potvrdi optimalnost rešenja kojim se referentna brzina sistema tračnih transportera dobija primenom fazi logike.

II. Tračni transporter kao deo jalovinskog sistema

Transport materijala se u različitim granama industrije vrši tračnim transporterima različitih tipova, sa različitim konstrukcijama i sistemima pokretanja. Karakteristično mesto primene tračnih transportera su rudnici, naročito rudnici sa površinskom eksploatacijom, u kojima se koriste diskontinualan ili kontinualan način otkopavanja. Na velikim površinskim kopovima, najčešće na kopovima gde se kopa uglj za potrebe termoelektrana, primenjuje se kontinualan način kopanja, pri čemu je mehanizacija organizovana u odgovarajuće celine. Proces vađenja uglja uključuje kopanje velikih količina zemlje u cilju otkrivanja ugljenog sloja i njen transport na odlagalište (BTO sistem – bager, traka, odlagač), a zatim kopanje uglja i njegov transport do drobilane ili utovarnih mesta u zavisnosti od organizacije samog površinskog kopa (BTD, odnosno BTU sistemi). Mogu se sresti i kombinovani načini otkopavanja, npr. diskontinualno otkopavanje i transport rude do drobilane kamionima, a zatim dalje tračnim transporterima.

U rudnicima sa kontinualnim otkopavanjem koriste se bageri sa radnim točkom Sl. II.1, ili bageri sa lancem (vedričari), Sl. II.2. Na ovim bagerima pored ostalog postoji i sistem tračnih transportera pomoću koga se prenosi iskopani materijal.



Sl. II.1 Bager sa radnim točkom
1 - Transporter na strelji radnog točka; 2 - Međutraka; 3 - Transportni most; 4
Istovarna traka



Sl. II.2 Bager sa lancem (vedričar), 1 - istovarna traka

Dalji transport iskopanog materijala vrši se pomoću sistema tračnih transporterata. Na Sl. II.3 prikazan je jedan od tračnih transporterata, kakvi se koriste na površinskim kopovima, a koji se sastoji od pogonske stanice, trase trake i povratne (završne) stanice sa presipnim levkom.



Sl. II.3 Tračni transporter, 1 - Pogonska stanica; 2 - Trasa trake

Tračni transporter se koriste i u daljem procesu, npr. kod odlaganja otkrivke (jalovine). Na Sl. II.4 prikazan je jedan odlagač sa odgovarajućim sistemom traka.

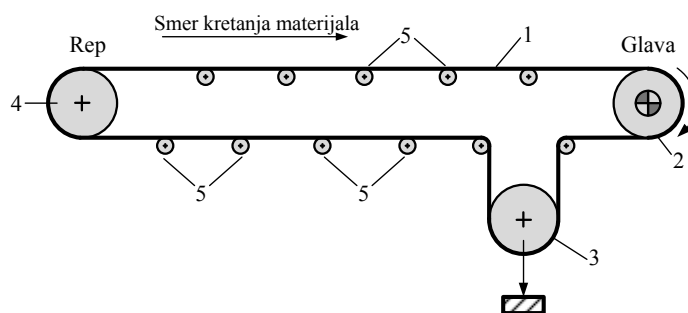
Prikazani tračni transporteri [28] su različitih dužina, sa pogonima različitih snaga, međutim služe istoj nameni i imaju isti princip rada. U novije vreme grade se vrlo dugački tračni transporter sa dužinama od nekoliko desetina kilometara, zbog čega su procesi pokretanja posebno zahtevni. U toku vremena polaska pogon mora da razvije potreban, ali stalan moment. Navedeni zahtevi mogu da se ostvare sa pogonima koji omogućavaju kontinualnu kontrolu brzine, zbog čega se svi novi pogoni tračnih transportera grade sa regulisanim pogonima sa asinhronim motorima.



Sl. II.4 Odlagač, 1 - Prijemna traka; 2 - Predajna traka - međutraka; 3 - Istovarna traka

II.1. Tračni transporter

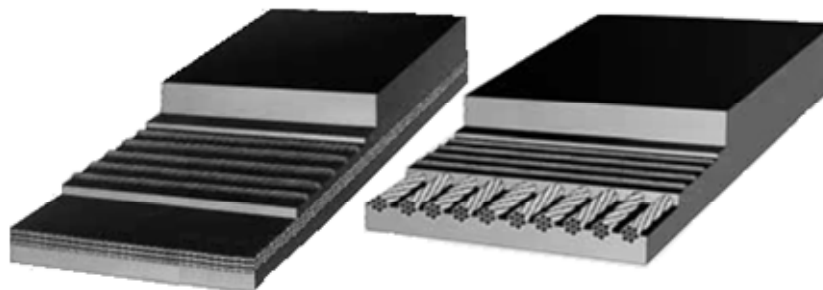
Osnovni delovi tračnog transportera su traka, pogonski bubanj sa pogonom, zatezni bubanj, povratni bubanj i noseće rolne. Uprošćeni prikaz tračnog transportera prikazan je na Sl. II.5. Kraj trake na kome se nalazi povratni bubanj se zove rep, a kraj na kome se nalazi pogonski bubanj se naziva glava.



Sl. II.5 Tračni transporter, 1 - Traka; 2 - Pogonski bubanj; 3 - Zatezni bubanj, 4 - Povratni bubanj; 5 - Noseće rolne

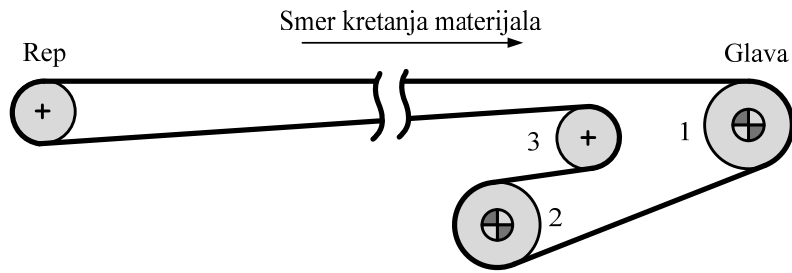
Traka: U zavisnosti od namene, dužine i kapaciteta tračnog transportera koriste se različite vrste traka. Transport rastresitog materijala se uglavnom vrši trakama

koje imaju noseći član i pokrivaјуći sloj. Noseći član može biti od tekstilnih vlakana ili od čeličnih vlakana, dok je pokrivaјуći sloj od gume. Poprečni preseki traka su prikazani na slici Sl. II.6, [58].

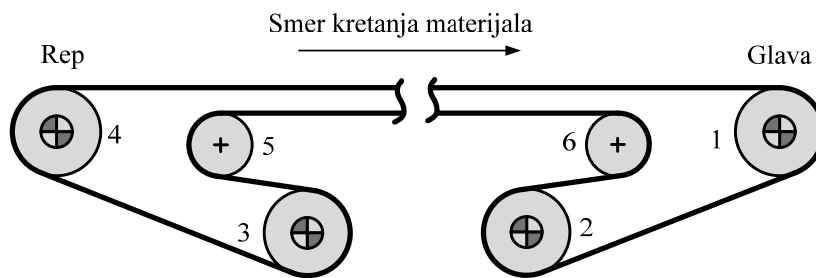


Sl. II.6 Poprečni presek trake („Pxoenix” 2004),
Tekstilna vlakna - levo; Čelična vlakna - desno

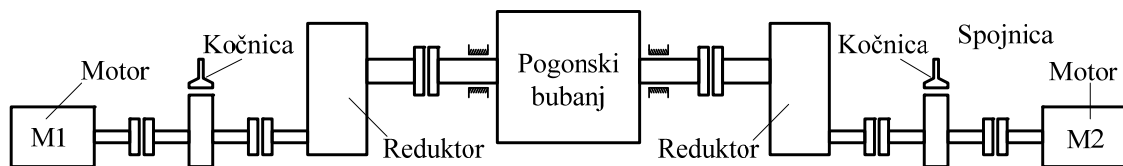
Pogonski bubanj: Pokretanje trake ostvaruje se pomoću jednog ili više pogonskih bubnjeva. Broj pogonskih bubnjeva zavisi od dužine trake, konfiguracije terena i kapaciteta transportera. Pogonski bubanj, ili bubnjevi se nalaze na kraju trake, gledano u smeru kretanja materijala, kao što je prikazano na Sl. II.7, ili Sl. II.8 na kojoj je prikazan tračni transporter sa dva pogonska bubnja. Dugački tračni transporteri, sa dužinama od 10 km pa i više, mogu da imaju pogonske bubnjeve i na svom početku gledano u smeru kretanja materijala (rep) Sl. II.8. Kod ekstremno dugačkih tračnih transportera (30-50 km) koriste se i među-pogoni. Pogonski bubnjevi su preko spojnice i reduktora spojeni sa pogonskim motorom. U zavisnosti od vrste pogona koriste se krute ili hidrodinamičke spojnice. Reduktori su višestepeni zupčasti, mada se kod nekih novih rešenja sa pogonima velikih snaga koriste sporohodni motori koji su direktno mehanički spregnuti sa pogonskim bubnjem. Zbog obezbeđenja potrebnog obrtnog momenta na pogonskom bubnju, pogon bubnja se često vrši sa po jednom grupom motora i reduktora sa obe strane. Između motora i reduktora se postavljaju mehaničke kočnice za bezbedno držanje bubnja, odnosno trake u stanju mirovanja, ili za sigurnosno (bezbedno) zaustavljanje u slučaju potrebe. Dispozicija opreme pogonskog bubnja prikazana je na slici Sl. II.9. Kod transporta rastresitog materijala gde se koriste trake sa gumom, spoljni plašt pogonskog bubnja je takođe pokriven gumom kako bi se postigao potreban koeficijent trenja radi prenosa obodne sile bubnja na traku.



Sl. II.7 Tračni transporter sa dva pogonska bubnja, 1 i 2 - Pogonski bubnjevi; 3 - Zatezni bubanj



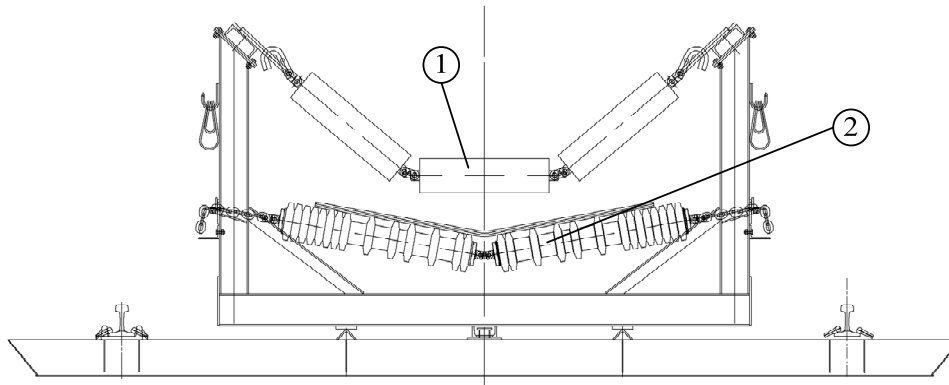
Sl. II.8 Tračni transporter sa pogonom na oba kraja, 1, 2, 3 i 4 - Pogonski bubnjevi; 5 i 6 - Zatezni bubanj



Sl. II.9 Pogonski bubanj sa pogonom na obe strane

Povratni bubanj: Kod traka sa pogonom samo na jednom kraju, na repu se nalazi jedan slobodno krećući bubanj. Njegova uloga je da obezbedi pravilno kretanje trake, odnosno prelazak trake sa povratnog na noseći deo. Noseća konstrukcija povratnog bubnja, odnosno povratni bubanj mora biti učvršćen za podlogu, kao tačka oslonca za zatezanje trake.

Noseće rolne: Postoje dve vrste nosećih rolni gornje, i donje. Na gornje rolne se oslanja traka sa materijalom, i one treba da obezbede pravilno kretanje trake i potreban profil materijala. Donji deo trake koji je bez materijala oslanja se na donje rolne, a njihov zadatak je da obezbede pravilno kretanje trake. Takođe, donje rolne, zajedno sa strugačem omogućavaju čišćenje materijala koji bi mogao da se nalepi na traku (blata), zbog čega su ove rolne posebno profilisane. Gornje rolne se postavljaju na dva puta manjem rastojanju od donjih. Način postavljanja rolni gledano u pravcu kretanja trake je prikazan na Sl. II.10.



Sl. II.10 Položaj nosećih rolni, 1 - Gornje noseće rolne; 2 - Donje noseće rolne

Zatezni bubanj: Uloga zateznog bubnja je da obezbedi potrebnu silu zatezanja u traci. Sila zatezanja u traci održava pravac kretanja trake duž trase, i obezbeđuje odgovarajuću silu trenja na pogonskom bubnju, kako bi se sprečilo proklizavanje trake. Položaj zateznog bubnja prikazan je na slikama Sl. II.5, Sl. II.7 i Sl. II.8. Postoje dva sistema zateznog bubnja:

- pokretni zatezni bubanj i
- nepokretni zatezni bubanj.

Pokretni zatezni bubanj kontinualno održava potrebnu silu u traci pomoću odgovarajućeg uređaja za zatezanje. Ovaj uređaj može da radi na principu korišćenja sistema opruga, ili kod traka većeg kapaciteta korišćenjem sile gravitacije Sl. II.5. Nepokretni zatezni bubanj se pre puštanja tračnog transportera u rad postavi u položaj koji će obezbediti potrebnu silu zatezanja u traci. Ova sila se mora kontrolisati, i vršiti potrebne korekcije, sa vremena na vreme. Kod tračnog transportera velikog kapaciteta nepokretni zatezni bubanj se pomera pomoću mehanizma na principu zupčaste letve, navojnog vretena, ili sistema koturova i sajli – vitla. Za pokretanje se koristi poseban električni pogon. Savremeni sistemi za zatezanje pokreću se pomoću pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača. Ovakav pogon omogućava i korekciju sile zatezanja na bazi merenja sile odgovarajućim senzorom. Na ovaj način sila zatezanja se automatski održava u opsegu zadate vrednosti sile, što je od posebnog značaja za sisteme koji rade bez posade.

Zatezni bubanj ima još jednu važnu ulogu. U normalnom radu traka čvrsto prijanja uz zatezni bubanj, i njegova periferna brzina je jednaka brzini trake. Merenjem brzine obrtanja zateznog bubnja, i njenim upoređenjem sa brzinom pogonskog motora trake može se detektovati proklizavanje trake na pogonskom bubnju. Pojava

proklizavanja može biti opasna po traku i pogonski bubanj, jer se usled trenja povećava temperatura na površinama u kontaktu, i može doći do požara. Ukoliko proklizavanje traje duže od nekog predviđenog vremena pogon trake se isključuje.

II.2. Sistem tračnih transportera

U slučajevima kada se materijal mora transportovati na velike udaljenosti, od nekoliko kilometara, ili nekoliko desetina kilometara, zbog dužine trase, ili potrebe da se trasa često pomera zbog potrebe proizvodnje formira se sistem od više tračnih transportera, tj. pogonskih stanica. Pogonske stanice se postavljaju duž predviđene trase, tako da se materijal prenosi sa trake na traku do krajnjeg odredišta. Na slikama Sl. I.1 i Sl. II.11 prikazan je V BTO sistem na površinskom kopu „Drmno”, kojim se vrši prenos otkrivke od bagera do odlagača.



Sl. II.11 Dispozicija V BTO sistema na površinskom kopu „Drmno”

Na površinskim kopovima pogonske stanice za traku širine 2000mm imaju instalisanu snagu pogona trake od 3 do 4 MW, tako da ceo sistem može da ima instalisanu snagu i do 20 MW. Upravljanje ovakvim sistemima zbog njihove veličine i dužine zahteva vrlo složenu strukturu komunikacije, razmene uzajamnih uslova između pogonskih stanica, kao i između pogonskih stanica i bagera i odlagača. Tračni transporteri koji su pored bagera, zovu se etažni, a njihov zadatak je da prime materijal sa bagera, zbog čega se na njima nalazi poseban dodatak (levak) za utovar rastresitog materijala (utovarna kolica), kao što je prikazano na Sl. II.12. Tračni transporter sa koga se materijal prebacuje na odlagač, zove se odlagališni i on u svom sastavu ima uređaj za pretovar „S” voz (Sl. II.12). Tračni transporteri koji povezuju etažne i odlagališne tračne transportere zovu se vezni.



Sl. II.12 Utovarna kolica (desno); „S” voz (levo)

Na mestima gde se vrši pretovar materijala sa jednog tračnog transportera na drugi postoji konstruktivni sklop, koji se zove presipno mesto, koji omogućava usmeravanje rastresitog materijala na naredni tračni transporter. Zbog različitih fizičkih osobina materijala (rastresitost, vlažnost), sklop za usmeravanje materijala mora biti prilagodljiv uslovima rada. Za ovo prilagođavanje koristi se odbojna ploča, koja se može pomerati tako da se materijal pravilno usmeri nezavisno od vrste ili vlažnosti, i tako spreči neželjeno rasipanje. Pomeranje odbojnih ploča može biti ručno, ali zbog potrebe za daljinskim upravljanjem, i veličine ploča koriste se mehanizmi sa električnim pogonom. Zbog potrebe za preciznom kontrolom položaja odbojne ploče, daljinskim upravljanjem, kao i automatizacijom rada ovog sistema, pogon ploče mora biti opremljen senzorom pozicije (npr. apsolutnim enkoderom). Na Sl. II.13 prikazan je izgled presipnog mesta.



Sl. II.13 Presipno mesto

II.3. Pogon tračnog transportera

Datim opisom tračnog transportera pokazano je da u sastavu jednog tračnog transportera pored pogona trake, mogu da postoje i drugi pogoni, pogon u sistemu za zatezanje trake, i pogon za pomeranje odbojne ploče. Pogonske stanice na površinskim kopovima mogu da budu sa sopstvenim transportnim mehanizmom za pomeranje sa jedne lokacije na drugu. U tim slučajevim obično se koristi električni pogon. Za rad tračnog transportera najbitniji je svakako pogon trake. U ovom delu biće prvo definisane osnovne karakteristike koje pogon trake treba da ima, a zatim će biti analizirane moguće vrste pogona za njeno pokretanje.

II.3.1. Osnovne karakteristike pogona tračnog transportera

Tračni transporter koji se koriste za transport rastresitog materijala najčešće su velikog kapaciteta što znači da su za njihovo pokretanje potrebni pogoni velikih snaga. Pogoni velikih snaga se zbog tehničkih i ekonomskih razloga u velikom broju slučajeva realizuju sa motorima za više naponske nivoe, npr 3, 6 ili 10kV. Kao što je već rečeno, zbog potrebne velike snage vrlo često pogon trake mora da se realizuje sa više motora. Kod višemotornih pogona [59] trake posebno je važno obezbediti ravnomernu raspodelu opterećenja između pojedinih motora.

Kod tračnih transportera posebno treba naglasiti potrebu za velikim momentom pri pokretanju trake, tj. velikim polaznim momentom. Ponekad je potrebno pokrenuti traku potpuno napunjenu sa materijalom, odnosno pod maksimalnim opterećenjem. Na otvorenom prostoru usled vremenskih uslova (sneg, led), uslovi pri pokretanju mogu biti dodatno otežani. Takođe, trase tračnih transportera mogu da budu sa usponom što dodatno povećava potreban moment.

Prilikom zaustavljanja zbog značajnih masa u sistemu, ukoliko se želi zaustavljanje trake za kreće vreme nego pri slobodnom zaustavljanju potrebno je raspolagati mogućnošću kočenja pomoću motora (električno kočenje), jer mehaničke kočnice ne bi mogle, a i ne bi bilo opravdano da se koriste u takvim slučajevima. U slučajevima gde je rep trake na višoj nadmorskoj visini od glave BC, neophodno je da pogon raspolaže sa mogućnošću električnog kočenja, i to u generatorskom režimu rada pogona, odnosno sa vraćanjem energije u mrežu. Kod sistema od više tračnih transportera u seriji postoji i potreba za kontrolisanim zaustavljanjem traka. Na primer,

ako je tračni transporter koji je drugi u nizu kraći, ili na usponu, u odnosu na prethodni gledano u smeru kretanja materijala, kod zaustavljanja jednostavnim isključenju pogona, drugi tračni transporter se zaustavlja za kraće vreme od prvog, tako da se nekontrolisana količina materijala prespe sa prvog na drugi. Da bi se izbegla ovakva situacija potrebno je kontrolisati proces usporjenja.

Tračni transporteri za transport rastresitog materijala rade obično u teškim radnim uslovima (prašina i vlaga) zbog čega motori koji se koriste za pokretanje moraju da budu odgovarajuće konstrukcije, odnosno sa vrlo visokim zaštitnim stepenom (IP 55). Zahvaljujući principu rada asinhronih motora, kod njih je moguće postići vrlo visok stepen zaštite na jednostavan i ekonomičan način.

Na osnovu izloženog, osnovne karakteristike koje treba da zadovolje pogoni traka su:

- potrebna snaga,
- veliki polazni momenat,
- mogućnost raspodele opterećenja,
- električno kočenje,
- optimizacija potrošnje energije,
- visok stepen zaštite.

Koje od navedenih karakteristika su neophodne, a koje nisu, zavisi od veličine, vrste i namene tračnih transportera.

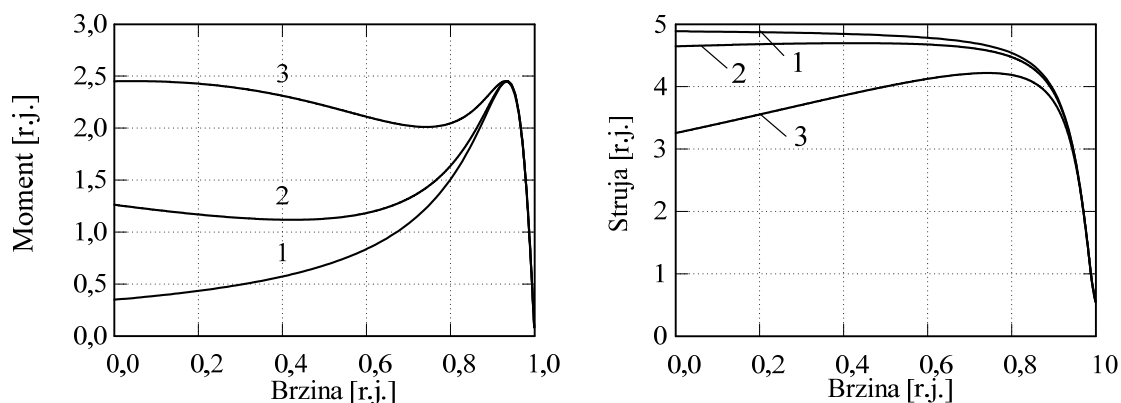
II.3.2. Pregled postojećih vrsta pogona tračnog transportera

Polazeći od činjenice da se kod motora za pogon traka velika pažnja mora pokloniti njihovoj zaštiti od spoljnjeg uticaja može se zaključiti da su asinhroni motori najpogodniji za ovu primenu sa obzirom na karakteristike i cenu. Zato će ovde biti analizirani različiti pogoni ali samo sa asinhronim motorima.

Pogon sa kaveznim asinhronim motorom direktno priključenim na mrežu:

Pogon sa ovakvim rešenjem pokretanja trake preporučuje se u slučajevima gde je potrebna snaga do 50 kW, i gde se pokretanje vrši sa jednim motorom, odnosno kod kraćih traka, kao što su trake na bagerima i odlagačima. Motori snaga do 50 kW su niskonaponski. Na Sl. II.14 prikazane su statičke karakteristike kaveznog asinhronog motora koji je direktno priključen na mrežu, levo je zavisnost momenta, a desno struje

od brzine. Krive označena sa 1 odgovaraju motoru standardne konstrukcije rotora. Kod ovog slučaja je očigledno da je polazni momenat motora vrlo mali što ne odgovara osnovnim zahtevima za pogon tračnog transportera. Krive 2 i 3 odgovaraju kaveznom asinhronom motoru sa dubokim žlebovima ili dvostrukim kavezom na rotoru. Ovakva konstrukcija rotora obezbeđuje povećanje polaznog momenta i smanjenje polazne struje što ovakve motore čini pogodnim za pogon tračnog transportera.



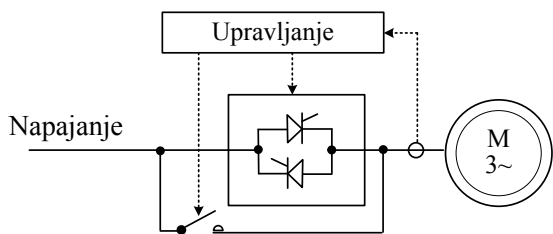
Sl. II.14 Statičke karakteristike kaveznog asinhronog motora direktno priključenog na mrežu

Nedostatak ovakvih pogona je da raspodela opterećenja, ukoliko se želi višemotorni pogon, zavisi od karakteristika momenat-brzina. Kako se ne mogu napraviti dva motora sa potpuno identičnim karakteristikama, usled malih razlika u karakteristikama nastaju značajne razlike u opterećenjima motora, na šta se ne može uticati. Drugi nedostatak je što pri pokretanju pod punim teretom period pokretanja je dug, odnosno motor neko duže vreme radi sa velikom strujom, usled čega se napreže i termički i mehanički. Pokretanja sa ovakvim pogonima su nagla (veliko ubrzanje i trzaj) što je nepovoljno za sve mehaničke delove i sklopove tračnog transportera, a naročito za traku.

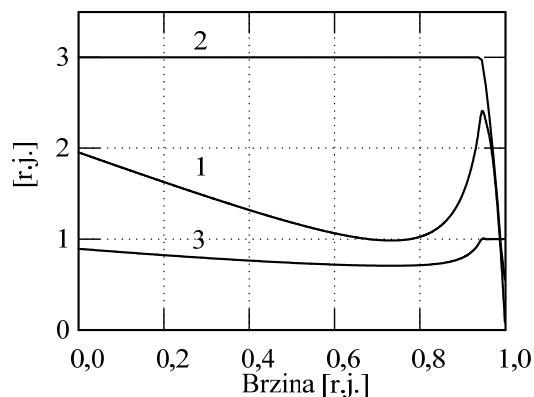
Pogon sa kaveznim asinhronim motorom koji se pokreće pri sniženom naponu: Ublažavanje negativnih efekata naglog polaska pogona kod direktnog uključenja motora moguće je snižavanjem napona u trenutku uključenja. Jedan od dobro poznatih postupaka je promena načina povezivanja statorskih namotaja, prevezivanjem iz zvezde u trougao. U trenutku uključenja fazni namotaji motora su povezani u zvezdu, a po postizanju određene brzine vrši se prespajanje u spregu trougao. Na ovaj način struja u trenutku polaska se smanjuje tri puta, ali isto toliko se smanjuje i polazni

moment. Ovo jednostavno rešenje nije zastupljeno kod tračnih transportera jer se kod njih baš u trenutku polaska zahteva najveći moment.

Kod nekih pogona tračnih transportera koristi se princip snižavanja napona u periodu polaska korišćenjem „soft-starter“-a. Soft-starter je poluprovodnički uređaj koji omogućava postepeno povišavanje napona uz održavanje stalne, unapred zadate struje motora u toku procesa ubrzanja pogona. Principijelna šema soft-startera prikazana je na Sl. II.15. Kontrolom ugla paljenja tiristora menja se efektivna vrednost napona motora. Smanjenjem napona smanjuje se i polazni moment, zato se u ovakvim slučajevima moraju koristiti motori sa jako povećanim polaznim momentom, kao što je prikazano na Sl. II.14, kriva 3 kako bi se dobio potrebnii polazni moment. Statičke karakteristike kaveznog asinhronog motora kod koga se napon menja od odgovarajuće minimalne vrednosti do nazivne vrednosti, ali tako da struja ne bude veća od vrednosti koja odgovara trostrukoj nazivnoj struji date su na Sl. II.16. Upoređenjem Sl. II.14 i Sl. II.16 vidi se da je polazni moment smanjen za oko 25%, ali je zato ograničena i polazna struja.



Sl. II.15 Principijelna šema soft-startera



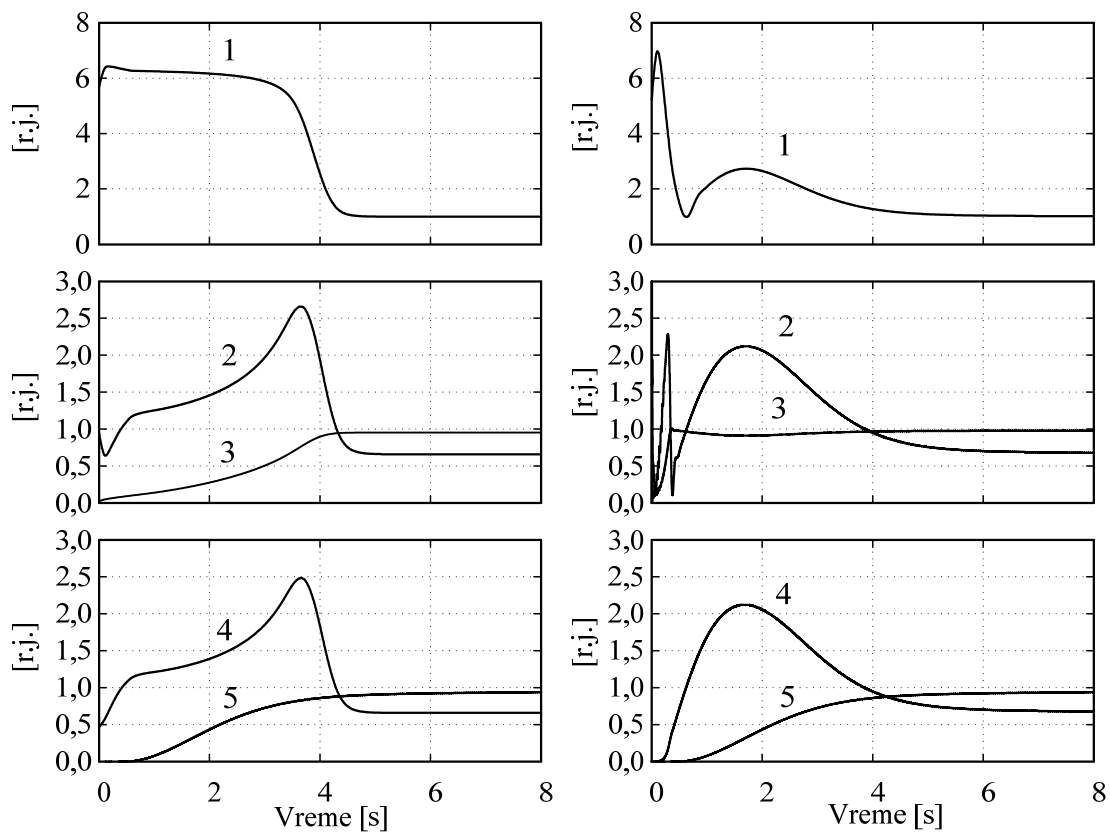
Sl. II.16 Statičke karakteristike kaveznog AM-a sa soft-starterom: 1 - Moment, 2 - Struja, 3 - Napon

Glavne osobine ovakvog načina pokretanja su:

- smanjena polazna struja.
- rotor motora mora biti specijalno konstruisan, odnosno sa jako povećanim polaznim momentom.
- mora postojati poseban prekidač kojim se soft-starter kratko spaja po završetku procesa polaska pogona.

- dobar odnos cene i kvaliteta.
- napon napajanja motora, a time i struje nisu prostoperiodične veličine, zato usled viših harmonika postoje izvesne smetnje u radu pogona (povećanje gubitaka i oscilacije momenta), ali su oni prisutni samo u kratkom periodu u toku procesa polaska pogona.

Tračni transporter sa hidrodinamičkom spojnicom: Nezavisno od načina pokretanja, zajednički problem pogona sa kaveznim asinhronim motorom je dug period procesa ubrzanja, a samim tim i dug period rada sa strujom većom od nazivne. Opisan problem se prevazilazi korišćenjem hidrodinamičke spojnice umesto krutih spojnika između motora i reduktora.



Sl. II.17 Uticaj korišćenja hidrodinamičke spojnice na trenutnu vrednost struje, momenta i brzine: Levo - kruto spojen pogon, desno - pogon spojen pomoću hidrodinamičke spojnice.

Motor: 1 - Efektivna vrednost struje, 2 - Moment, 3 - Brzina;
 Pogonski bubanj: 4 - Moment, 5 - Brzina.

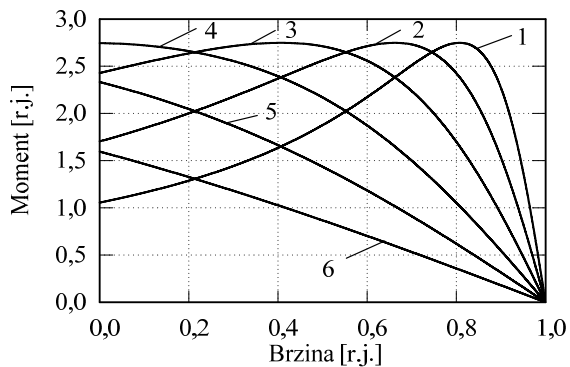
Sušтина rada pogona sa hidrodinamičkom spojnicom je da motor startuje neopterećen, i za vrlo kratko vreme dostigne približno nazivnu brzinu, zbog toga je

period rada sa velikom strujom vrlo kratak. Posle dostizanja pune brzine motora, usled centrifugalne sile postepeno se povećava količina ulja u radnom kolu spojnice, i tada počinje da se prenosi moment preko nje ka reduktoru, odnosno pogonskom bubnju, i traka polako ubrzava. Period ubrzanja trake je duži od perioda ubrzanja motora, a ta razlika zavisi od tipa hidrodinamičkih spojnica. Na Sl. II.17 prikazane su vremenske zavisnosti karakterističnih veličina pri pokretanju pogona kada je kavez asinhroni motor kruto mehanički spregnut sa opterećenjem, i kada se koristi hidrodinamička spojnica, ali pri istom momentu opterećenja i istoj inerciji. Upoređenjem dijagrama sa Sl. II.17 vidi se da je kod direktno mehanički spregnutog pogona period zaletanja duži, ali što je naročito bitno, polazna struja traje znatno duže, što nepovoljno utiče na motor i ostale elemente pogona.

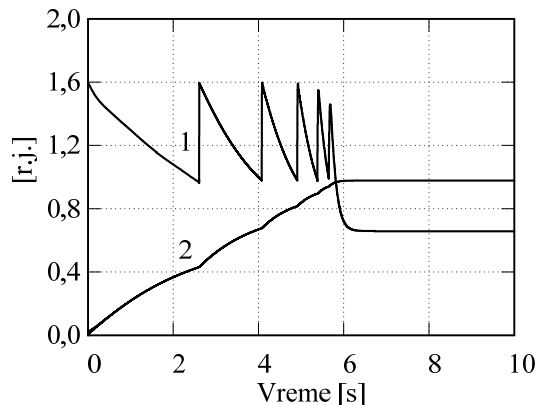
Pogon sa asinhronim motorom sa namotanim rotorom i kliznim prstenovima: Kod pogona sa asinhronim motorom sa namotanim rotorom snage do 250 kW koriste se niskonaponski, a preko 250 kW sredjenaponski motori na 3 ili 6 kV. Povezivanjem spoljnog dodatnog otpora u kolo rotora mogu se dobiti različite karakteristike istog motora. Kriva 1 odgovara slučaju kada su prstenovi kratko spojeni, odnosno nema dodatog otpora. Kriva 5 je sa dodatom vrednošću otpora koja obezbeđuje da je polazni momenat jednak najvećem momentu koji motor može da da. Dodavanjem takve vrednosti otpora u trenutku uključenja motora obezbeđuje se maksimalan polazni moment, što odgovara naznačenim potrebama pogona tračnog transportera. Na Sl. II.19 prikazani su moment i brzina motora koja se dobija postepenim smanjenjem otpora uključenog u kolo rotora u toku polaska pogona pod istim uslovima kao na Sl. II.18. Pravilnim izborom „koraka” isključenja i dinamike isključenja može se održavati moment na približno maksimalnoj vrednosti do postizanja nazivne brzine. Posebno treba naglasiti da se pri opisanom načinu pokretanja pogona tračnog transportera smanjuje i polazna struja, što je ilustrovano na Sl. II.20. Kriva 5 na Sl. II.20 odgovara krivoj 5 na Sl. II.18, što pokazuje da se maksimalan polazni moment dobija sa značajno manjom polaznom strujom, nego ako se ne bi koristio dodatni otpor. Na Sl. II.21 prikazane su struja i brzina u režimu kao na Sl. II.19.

Kod višemotornih pogona tračnih transportera izjednačavanje opterećenja između motora može se ostvariti dodavanjem malog otpora u kolo rotora.

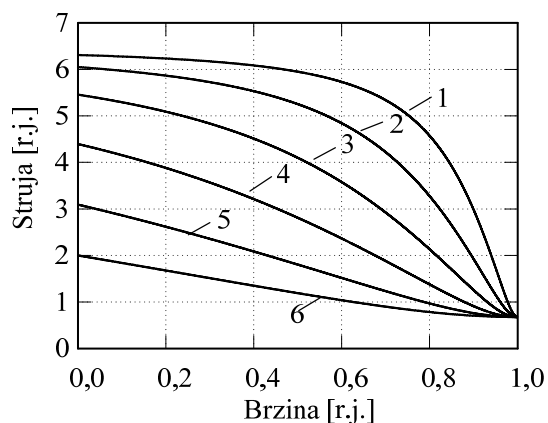
Zbog navedenih osobina pogona sa asinhronim motorom sa namotanim rotorom ovaj način pokretanja tračnog transportera je bio i jeste najzastupljeniji kod transporta rastresitog materijala, naročito na površinskim kopovima.



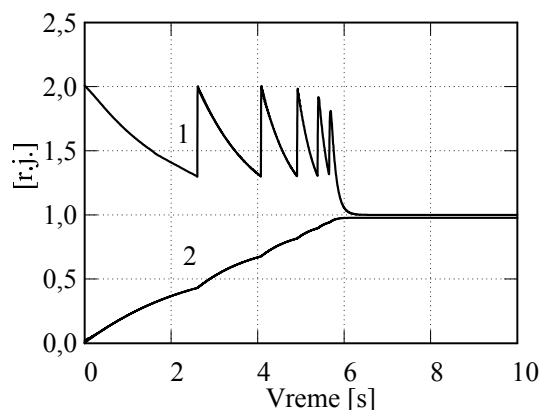
Sl. II.18 Karakteristike AM - a sa namotanim rotorom sa različitim vrednostima otpora u rotorskom namotaju. Rastući brojevi u oznakama krivih odgovaraju rastućim vrednostima rotorske otpornosti



Sl. II.19 Trenutne vrednosti momenta i brzine u toku polaska AM - a sa namotanim rotorom:
1 - Moment motora, 2 - Brzina



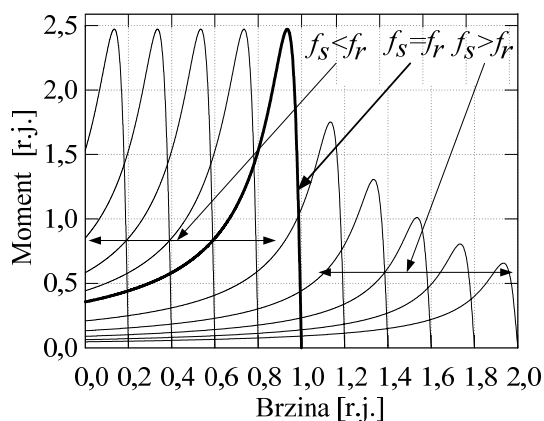
Sl. II.20 Zavisnost struje od brzine za različite vrednosti otpornosti u rotoru. Rastući brojevi u oznakama krivih odgovaraju rastućim vrednostima rotorske otpornosti



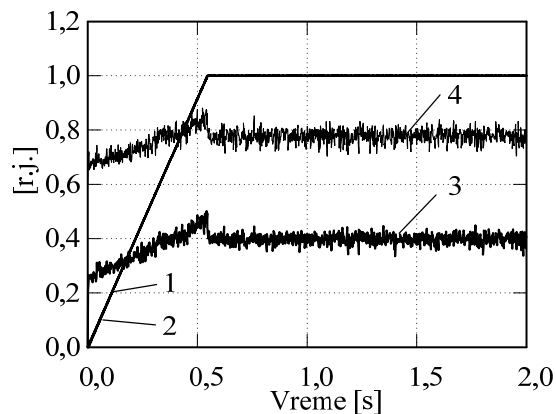
Sl. II.21 Trenutna vrednost struje i brzine u toku polaska AM - a sa namotanim rotorom:
1 - Efektivna vrednost struje motora, 2 - Brzina

Pogon tračnog transportera sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača: Svi poznati proizvođači opreme za elektromotorne pogone proizvode frekventne pretvarače (FP) različitih snaga, tipova i namena. Nesumnjive su prednosti pogona sa frekventnim pretvaračima i kaveznim asinhronim motorima koji omogućavaju da se realizuju efikasni pogoni sa regulisanom brzinom. Na Sl. II.22

prikazane su mehaničke karakteristike frekventno regulisanog pogona sa asinhronim motorom. Na Sl. II.23 prikazane su trenutne vrednosti karakterističnih veličina kod zaletanja pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača, sa istim uslovim rada kao na Sl. II.17. Očigledno je da se isti proces zaletanja pogona ostvaruje sa manjom strujom nego u slučaju primene hidrodinamičke spojnice. Pored ove prednosti, postoje i druge mogućnosti koje ovaj način pokretanja čine vrlo pogodnim za primenu kod pogona tračnih transportera, o kojima će biti reči u tekstu koji sledi.



Sl. II.22 Mehaničke karakteristike pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača



Sl. II.23 Trenutne vrednosti struje, momenta i brzine u toku zaletanja pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača,
1 - Referentna brzina, 2 - Brzina,
3 - Moment,
4 - efektivna vrednost struje motora

II.3.3. Upoređenje klasičnih pogona i pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača na tračnom transporteru

Prilikom upoređenja klasičnih i pogona transportera sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača treba imati u vidu sledeće aspekte:

- a) brzinu kretanja trake,
- b) dužinu transportera,
- c) pokretanje transportera,
- d) kočenje transportera,
- e) neravnomernu raspodelu opterećenja,
- f) mogućnost proklizavanja,

g) dimenzionisanje elemenata transportera.

a) Brzina kretanja trake

Osnovna karakteristika kod konvencionalnih pogona je konstantna brzina u stacionarnom režimu rada, za razliku od pogona sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača, kod kojih je omogućena promena brzine tračnih transportera. Kod konvencionalnih pogona gde su tehnološki zahtevi za promenom brzine izraženi primenjivani su relativno složeni sistemi: varijatori, hidromotori, hidrospojnice sa promenljivim punjenjem itd. Karakteristike ovakvih pogona su visoka cena, relativno složena konstrukcija i neadekvatna momentna karakteristika, što je imalo za posledicu nizak energetske stepen iskorišćenja pogonskog postrojenja. Navedeni tipovi pogona su primenjivani isključivo gde je to izričito zahtevano od strane tehnološkog procesa.

Pored prednosti pogona transportera sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača koje su objašnjene u prethodnom poglavlju, treba naglasiti i jednostavno upravljanje brzinom sa dodatnom mogućnošću povećanja energetske efikasnosti tračnog transportera, što je i predmet ove doktorske disertacije.

b) Dužina tračnog transportera

Sa tehnološkog aspekta, tračni transporteri sa pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača omogućavaju jednu veoma važnu prednost, a to je da pri istim instalisanim snagama pogona oni omogućavaju veću dužinu pojedinačnih transportera.

c) Pokretanje transportera

Detaljno je obrađeno u poglavlju II.3.2. Pokazano je da se primenom pogona sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača ostvaruje pokretanje tračnih transportera bez mehaničkog i termičkog naprezanja motora, sa kontrolisanim ubrzanjem, čime se izbegava nepovoljan uticaj trzaja na sve mehaničke delove i sklopove tračnog transportera, a naročito na traku.

d) Kočenje transportera

Analiziraće se dva režima kočenja, kočenje pri stalnoj, radnoj brzini, i kočenje kod zaustavljanja transportera.

Potreba za kočenjem pri stalnoj brzini se javlja kod transportera koji prenose materijal sa veće nadmorske visine na nižu. Ukoliko je potencijalna komponenta sile koja u ovom režimu deluje na mase sistema koje se translatorno kreću (traku i materijal na njoj) veća od otporne sile kretanja, potrebno je da pogonski motor razvija kočni moment koji će obezbediti kretanje stalnom brzinom. Karakterističan primer je traka radog točka na bageru pri kopanju u podetažama iznad horizontalne ose bagera. U ovakvim režimima asinhroni motori koji su priključeni na mrežu prelaze u režim asinhronog generatora, i obrću se brzinom koja je neznatno veća od sinhronne brzine. Praktično to znači da je brzina motora, a time i trake, za nekoliko procenata veća od brzine kod motornog režima. Električna energija koja se pri ovome generiše pokriva gubitke u motorima, i ako postoji višak energije, on se vraća u mrežu. Ovaj režim se naziva režim rekuperacije energije. Očigledno da se radi o jednom povoljnom režimu rada koji obezbeđuje potrebne radne uslove, sa uštedom energije, bez dodatnih ulaganja u opremu.

Kod pogona sa frekventnim pretvaračima, gde motori nisu direktno na mreži, potrebna je dodatna oprema za „prihvatanje” viška energije pri kočenju. U praksi se koriste dva načina „apsorbovanja” energije. U prvom slučaju se koriste otpornici i čoper za kočenje, pri čemu se snaga otpornika mora dimenzionisati na snagu koja se razvija pri kočenju. Ovakav režim naziva se režimom dinamičkog kočenja, i karakteriše ga činjenica da se oslobođena energija pri kočenju pretvara u toplotu, odnosno praktično beskorisno gubi. Ako je energija kočenja značajna, treba koristiti frekventne pretvarače sa regulisanim ispravljačem prema mreži, koji omogućava vraćanje viška energije iz jednosmernog međukola u mrežu. Opisano rešenje obezbeđuje rekuperaciju energije kočenja. Oba opisana načina kočenja zahtevaju dodatnu opremu, odnosno dodatna ulaganja, i povećanje cene opreme. U pogledu investicija, rešenje sa čoperom i otpornikom je jeftinije, ali u pogledu eksploatacionih troškova, rešenje sa reverzibilnim ispravljačem u okviru frekventnog pretvarača je povoljnije. Odluka o izboru rešenja zavisi od količine energije koju treba apsorbovati.

Mnogo važnije pitanje u pogledu kočenja je kočenje kod zaustavljanja transportne trake. Treba razlikovati dva slučaja zaustavljanja trake:

1) Regularno zaustavljanje trake: kod rada u okviru BTO ili BTD sistema to podrazumeva zaustavljanje svih elemenata sistema. U ovom slučaju nije neophodno

kontrolisati proces zaustavljanja, jer ne postoji opasnost od zatrpavanja presipnih mesta, ili nekih drugih neželjenih posledica.

2) Zaustavljanje u slučaju neželjenih situacija, opasnih po ljude ili opremu: u ovim situacijama potrebno je obezbediti kontrolisano kočenje, koje treba da se ostvari za najkraće moguće vreme.

Kočenje kod zaustavljanja može da se ostvari pomoću mehaničkih kočnica, ili pomoću elektromotora. Mehanička kočenja dovode do ubrzanog habanja opreme za kočenje, zbog čega se ne koriste kod regularnih zaustavljanja. Jedino ima smisla da se mehaničko kočenje koristi kod nužnog zaustavljanja. Međutim, u praksi, mehaničke kočnice se koriste samo za držanje trakastog transportera u stanju mirovanja, a ne za zaustavljanje.

Mogućnost za primenu električnog kočenja kod zaustavljanja praktično ne postoji kod pogona sa motorima čiji su statori priključeni direktno na mrežu, to važi za sve ovakve pogone, i kod pogona sa rotorskim upuštačem, i svim varijantama sa kavezanim motorima.

Posebno konstruisani soft-starteri koji raspolažu mogućnošću bezkontaktne promene redosleda faza bi mogli da se koriste u režimu protivstrujnog kočenja sa kontrolisanom strujom kočenja. Ovakvi soft-starteri moraju da budu opremljeni sa pet grupa anti-paralelno vezanih tiristora, za razliku od šeme prikazane Sl. II.15 gde postoje samo tri ovakve grupe. Naravno da su ovakvi uređaji značajno skuplji. Takođe, treba imati u vidu da u režimima protivstrujnih kočenja kod kavezanih motora dolazi do znatno povećanog zagrevanja samog motora, jer energija koja se disipira u motoru skoro je dva puta veća od kinetičke energije koja se oslobađa u toku kočenja.

Pogoni sa frekventnim pretvaračima mogu da obezbede kočenje u cilju zaustavljanja, sa kontrolisanim usporenjem, koje se može podešavati po želji. Kod postojećih rešenja transportera sa ovakvim pogonima koriste se dva različita koeficijenta usporenja, manja vrednost koeficijenta usporenja kod regularnog zaustavljanja trake, odnosno BTO ili BTD sistema, i veća vrednost koeficijenta usporenja u slučaju nužnog zaustavljanja, kada je potrebno za najkraće vreme zaustaviti traku, na primer u slučaju povlačenja „poteznog” užeta. Kod kočenja u cilju zaustavljanja potrebno je „prihvatiti” energiju koja se oslobađa pri kočenju, kao i kod kočenja kod traka pod nagibom. Kako se ovde radi o manjoj količini energije, s obzirom

da ovaj režim kratko traje, najčešće se za „prihvatanje” energije kočenja koristi otpornik i čoper za kočenje. Energija koja se oslobađa pri zaustavljanju jednaka je razlici između kinetičke energije sistema u trenutku otpočinjanja kočenja, i energije potrebne za savlađivanje otpora kretanja u toku zaustavljanja. Srednja snaga kočenja je jednaka odnosu energije kočenja i vremena zaustavljanja, i veća je kod zaustavljanja za kraće vreme, odnosno kod nužnog zaustavljanja, tako da opremu za kočenje treba dimenzionisati prema ovoj većoj snazi kočenja.

Ukoliko je električno kočenje potrebno samo kod zaustavljanja nije opravdano koristiti pretvarače sa reverzibilnim ispravljačima, zbog cene.

Opisana električna kočenja su naravno moguća samo ako su svi elementi pogona u funkcionalnom stanju, i mogu da izvrše svoju ulogu. U slučajevima kvara na bilo kom elementu pogona, pretvaraču, motoru, spojnici, reduktoru, itd. treba primeniti zaustavljanje jednostavnim isključenjem pogona, koje se vrši tako što se blokiraju tranzistori u invertoru, i motor ostaje bez napajanja. U stručnoj terminologiji se to zove režim „*coast*”, odnosno upravljački sistem izdaje pretvaraču komandu „*coast*”. Ako ima više pogona i pretvarača ovu komandu dobijaju svi pretvarači, nezavisno od toga u kom od pogona je nasto kvar. Moguće je da pretvarači u ispravnom pogonima ostanu u funkciji, i ovi pogoni izvrše električno kočenje, ali kako bi oni tada morali da preuzmu ulogu i isključenog pogona, onda bi neki od parametara morali da se promene, na primer da se produži vreme zaustavljanja, i time smanji snaga kočenja. Opravdanost ovakvog usložnjavanja upravljačkog algoritma treba pažljivo analizirati.

Očigledno je da u pogledu kočenja radi zaustavljanja pogona postoji nesumnjiva prednost na strani pogona s frekventnim pretvaračima u odnosu na druge pogone. Međutim, kod projektovanja pogona za tračne transportere pažljivo treba analizirati opravdanost investicije u opremu za električno kočenje kod zaustavljanja, za čoper i otpornik za kočenje. Kod dugačkih transportera mogu se imati veliki otpori kretanja tako da traka po prirodi stvari može da stane za kratko vreme, i da kočenje i nije potrebno, odnosno oprema za kočenja. U takvim slučajevima, kod zaustavljanja trake transportera treba izvršiti jednostavno isključenje pretvarača, komandom za blokiranje tranzistora u invertoru „*coast*”.

e) Neravnomerna raspodela opterećenja

Neravnomerna raspodela opterećenja može se javiti kod pogona sa više pogonskih bubnjeva zbog različitih prečnika bubnjeva, što je posledica habanja. Pri remontu, pogonski bubnjevi se uglavnom ne zamenjuju u isto vreme tako da će razlike u prečnicima postati još veće posle zamene jednog od bubnjeva novim. Obimne brzine bubnjeva su jednake međusobno, i jednake su brzini trake. Međutim, usled nejednakih prečnika bubnjeva, dolazi do značajne, neželjene nejednakosti brzina motora na različitim pogonskim bubnjevima. Usled nejednakih brzina dolazi do neravnomerne raspodele momenata, tako da u nekim slučajevima može da se desi da jedan motor čak razvija negativan moment, odnosno koči, dok drugi motor preuzima ukupno opterećenje, i dodatno mora da savlađuje kočni moment motora koji je spregnut sa bubnjem manjeg prečnika.

Opisani problem se rešava kod pogona sa namotanim rotorima tako što se u kolo rotora motora koji preuzima veće opterećenje, trajno uključuje određena vrednost otpora da bi se prilagodio oblik mehaničke karakteristike i približno ravnomerno podelilo opterećenje između motora. U slučaju kada se koriste soft-starteri moguće je problem nejednakih opterećenja prevazići smanjenjem napona kod motora koji preuzima veći moment, ako se motori napajaju iz različitih soft-startera. Razmatrane varijante prevazilaženja problema nejednakih bubnjeva su relativno jednostavne, i ne zahtevaju dodatnu opremu. Nedostatak u slučaju otpora u kolu rotora je u dodatnim gubicima energije u dodatnom otporu. Kod napajanja iz soft-startera dolazi do povećanog zagrevanja motora kod koga se smanjuje napon, jer on zbog smanjenog napona radi u režimu napajanja nesinusnim naponom, usled čega se zbog viših harmonika povećavaju gubici. Kod hidrauličkih spojnica problem nejednakih prečnika pogonskih bubnjeva se rešava različitom količinom punjenja spojnica uljem na pogonima.

Nejednaki prečnici pogonskih bubnjeva u slučaju pogona sa frekventnim pretvaračima ne predstavljaju nikakav problem, jer se jednostavnom korekcijom učestanosti mogu uskladiti brzine motora, kako bi se dobila jednaka raspodela opterećenja. Promena brzine, odnosno učestanosti se obezbeđuje kroz upravljački sistem.

f) Mogućnost proklizavanja

Kod tračnih transporterata, vučna sila sa pogonskih bubnjeva na traku se prenosi na principu adhezije. Adhezijska sila mora da bude veća od vučne sile, u protivnom traka proklizava, odnosno brzina trake je različita, manja od obimne brzine bubnja. Adhezijska sila zavisi od pritiska trake na pogonske bubnjeve, brzine, i od stanja dodirnih površina. Sila adhezije je upravo srazmerna sili zatezanja, a obrnuto srazmerna brzini. Ukoliko dođe do opuštanja trake, ili usled zaprljanosti trake ili plašta bubnja, smanjuje se adhezijska sila, i može doći do proklizavanja.

Transporteri koji su danas u upotrebi imaju sistem za detekciju proklizavanja, koji rade na principu upoređenja brzine pogonskih sa brzinom jednog pasivnog bubnja. U slučaju proklizavanja, pogoni se zaustavljaju, jer može doći do različitih neželjenih pojava, zatrpavanja presipnih mesta, zakošenja trake, paljenja trake, i sl. Preventivna mera je svakako kontrola zategnutosti trake, i automatsko održavanje sile zatezanja u zadatim okvirima.

Klasična rešenja pogona ne obezbeđuju mogućnost direktne kontrole vučne sile, odnosno momenta motora, i kod njih nije moguće primeniti opisanu metodu kontrole proklizavanja. Soft-starteri takođe nemaju mogućnost direktne, brze i precizne kontrole momenta, koja je neophodna u ovom slučaju. Pogoni sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača raspolažu sa potrebnim mogućnostima kontrole momenta, i kod njih je moguća realizacija kontrole proklizavanja, kontrolom vučne sile.

g) Dimenzionisanje elemenata transporterata

U poređenju sa klasičnim transporterima, tračni transporteri sa pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača se mogu dimenzionisati na manju prekidnu čvrstoću trake, manje pogonske reduktore, manje bubnjeve, a samim tim i noseću konstrukciju.

Zbog navedenih činjenica danas se širom sveta koriste tračni transporteri različitih veličina i namene kod kojih se može regulisati brzina. Na primer, na kopu Nohten u Nemačkoj primenjeni su pogoni sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača za pokretanje tračnog transporterata dužine 2,6 km, kapaciteta 26000 t/h, instalisane snage 4×2000 kW. Na kopu Welzow Sud, takođe u Nemačkoj, već više godina radi sistem od 11 tračnih transporterata od kojih je pet sa pogonima sa

asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača, čije su snage od 630 do 900 kW. Kod ovih tračnih transporterera koristi se promena brzine u radu od 3 do 6 m/s, a u cilju optimalnog iskorišćenja performansi tračnog transporterera. Sistem za otkopavanje otkrivke (BTO), kapaciteta 8800 m³/h na kopu Janschwalde u Nemačkoj ima šest tračnih transporterera sa pogonima sa asinhronim motorom koji se napajaju iz frekventnih pretvarača. Maksimalna dužina tračnog transporterera je 3,3 km, sa motorima na gornjem pogonskom bubnju 2×1250 kW, i na donjem pogonskom bubnju 2×900 kW. Širina trake je 2 m. Frekventni pretvarači koji su u ovim postojanjima korišćeni su za ulazni napon od 690 V.

U Srbiji postoje dva sistema od po pet tračnih transporterera, od kojih je svaki ukupne dužine od oko 8,5 km, sa po 4×1000 kW instalisane snage po pogonu, sa pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača na svakoj pogonskoj stanici tračnog transporterera. Jedan je u rudniku Drmno, Kostolac, a drugi u rudniku Tamnava - Zapad. Frekventni pretvarači koji su u ovim postojanjima korišćeni su za ulazni napon od 690 V (ABB ACS800) [47].

Za dopremanje boksita do aluminijumskog kombinata u zapadnoj Australiji (Worsley Alumina Refinery) primenjen je sistem od dva transporterera ukupne dužine od 50 km. Maksimalna brzina transporta je 7 m/s. Prva traka je dugačka 30 km i na trasi se nalazi nekoliko uspona i padova. Pogon trake ostvaruju dva motora na glavi od po 3300 kW, i dva motora na repu od po 1700 kW. Druga traka je dugačka 20 km, i pokreću je dva motora od po 3300 kW. Korišćeni su frekventni pretvarači za srednji napon od 3,3 V, standardne ABB serije ACS1000.

Pored ovih nabrojanih postoje brojni primeri tračnih transporterera sa pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača u eksploataciji kako u rudnicima, tako i u termoelektranama: Čile (Escondida, Mantoverde, El Tesoro), Bugarska (Marica istok), Vijetnam (Uong Bi, Cam Pha Grinding, Song Gianh), Kina (Shandong, Jaingsu), Švajcarska (Werk Riburg), Kuba (Pinares de mayari), Nemačka (Mibrag, Halle SAD (Silver Grove), Irska (Irish Cement), Izrael (Kraftwerk Rutenberg), Belgija (Gyproc), Saudijska Arabija (Al Jubail), kao i u lukama i skladištima (Rotterdam, Rijeka, Antwerpen, Poert Los Vilos – Čile, Port Pipavav - Indija).

II.3.4. Upravljanje pogonom tračnog transportera sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača

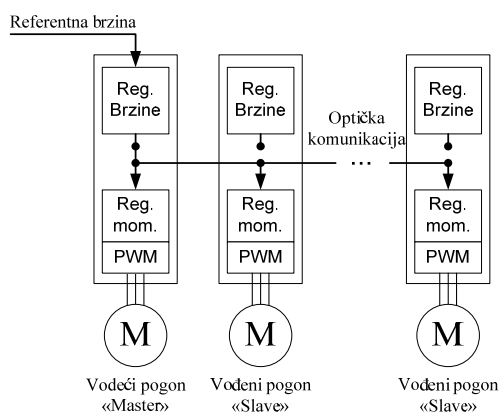
Klasični pogoni za transportere ne raspolažu sa mogućnošću podešavanja brzine. Soft-starteri mogu da obezbede kontrolu polazne struje, dok su im u pogledu opsega podešavanja brzine mogućnosti vrlo skromne. U zavisnosti od mehaničke karakteristike motora i opterećenja opseg u kome se može podešavati brzina je maksimalno između 90 i 100% nazivne brzine. Sa druge strane, upravljanje brzinom motora na bazi promene napona napajanja ima vrlo spor odziv. Zbog svega ovoga soft-starteri, kao što im i ime kaže, koriste se samo za kontrolisani polazak, a ne i za upravljanje pogonom u toku normalnog rada.

Frekventni pretvarači raspolažu mogućnošću podešavanja brzine u vrlo širokom opsegu, praktično od 0 do 200%. Sa druge strane, savremeni algoritmi upravljanja, kao što su vektorska regulacija, ili direktna kontrola momenta, koji se danas standardno primenjuju kod frekventnih pretvarača renomiranih proizvođača, obezbeđuju izuzetno brz odziv pogona na upravljačke komande, tako da je moguće realizovati vrlo složene upravljačke strukture. Posebno je ovde bitno istaći da se vrlo jednostavno mogu realizovati višemotorni regulisani pogoni, koji obezbeđuju kontrolu brzine sistema, i ravnomernu raspodelu opterećenja između pogona. Jedno od važnih pitanja višemotornih pogona je raspodela opterećenja između pojedinih pogona. Ukoliko su svi pogoni iste nazivne snage, raspodela mora da bude ravnomerna, a ako su pogoni različitih nazivnih snaga, raspodela opterećenja mora biti srazmerna nazivnim snagama pod uslovom da su nazivne brzine motora iste. Ukoliko se razlikuju nazivne brzine motora, raspodela mora biti srazmerna nazivnim momentima. Pretvarači koji se koriste u praksi u svom internom regulacionom sistemu koriste normalizovane vrednosti promenljivih, tako da ako se koristi digitalna tehnika, u upravljačkom sistemu vrednosti promenljivih se izražavaju u procentima. Uobičajeno je da vrednost referentnog momenta koja odgovara nazivnom momentu motora ima vrednost 100%, tako da je dovoljno kod višemotornog pogona jednostavno proslediti informaciju o referentnom momentu svim pretvaračima u procentima, a svaki od pogona će srazmerno svom nazivnom momentu da da svoj doprinos u ukupnom momentu višemotornog pogona. Kod upravljačkih sistema koji su realizovani u analognoj tehnici za njihovo napajanje koristi se obično standardni opseg jednosmernog napona $\pm 15V$, pa se kod pogona

nejednakih nazivnih vrednosti mora voditi računa o usklađivanju vrednosti upravljačkih signala pomoću odgovarajućeg koeficijenta, kojim se definiše ravnomerna raspodela opterećenja.

Danas se za upravljanje pogonima na tračnim transporterima koriste dve osnovne upravljačke strukture. Prva upravljačka struktura bazira na tzv. principu „*master-slave*”, odnosno vodećeg i vođenih pogona. Kod ovog načina upravljanja koriste se integrisani regulator brzine, i integrisani regulator momenta u samom pretvaraču. Principijelni blok dijagram ovakvog upravljačkog sistema za jedan transporter prikazan je na slici Sl. II.24.

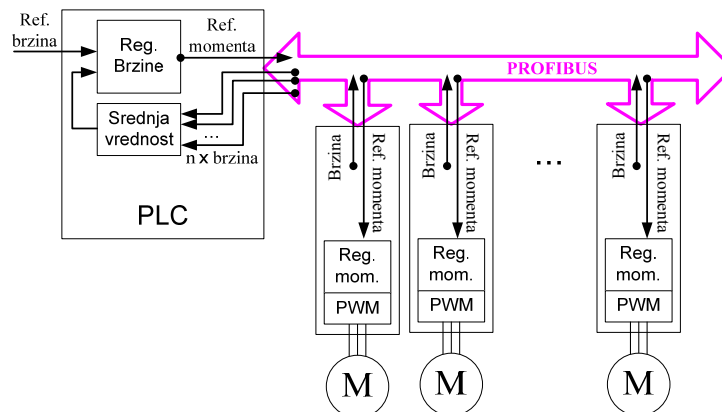
Kod vodećeg frekventnog pretvarača se koristi integrisani regulator brzine, a izlaz iz ovog regulatora, koji predstavlja referentni momenat prosleđuje se u regulator momenta ovog, i svih ostalih, vođenih pretvarača. Kod vođenih pretvarača se ne koriste regulatori brzine. Vođeni pretvarači rade u režimu samo kontrole momenta. Komunikacija između pretvarača se ostvaruje nekim od standardnih protokola, ili nekim od posebnih protokola koji proizvođači razvijaju za svoje potrebe. Da bi se obezbedila kvalitetna regulacija pogona potrebno je da se obezbedi odgovarajuća brzine komunikacije. Danas se uglavnom koriste optičke komunikacije između pretvarača.



Sl. II.24 Upravljačka struktura „*master-slave*”

Druga varijanta upravljanja pogonima na tračnim transporterima je sa regulatorom brzine, koji reguliše srednju brzinu pogona, i realizuje se u okviru nadređenog upravljačkog sistema, računara. Izlaz iz ovog regulatora je referentni momenat, i prosleđuje se ravnopravno svim pretvaračima, koji rade u režimu kontrole momenta. Kod ovog sistema svi pretvarači su ravnopravni, i imaju istu ulogu. Funkcija regulatora brzine implementirana je u PLC-u, gde se generiše referentna brzina.

Regulator brzine može da bude PI ili PID. Ne preporučuje se jak uticaj diferencijalnog dejstva zbog elastičnosti traka. Komunikacija između PLC-a i frekventnih pretvarača mora da bude ostvarena odgovarajućim brzim protokolom, jer oni razmenjuju više informacija preko Control Word, Status Word, Fault Word, kao što su ModBus+, ProfiBus, Ethernet, DeviceNet, brzina komunikacije ne bi trebalo da je manja od 1,5Mb/s. Principijelni blok dijagram prikazan je na Sl. II.25.



Sl. II.25 . Upravljačka struktura sa regulatorom srednje brzine

Upravljačka struktura „*master-slave*” ima sledeće odlike:

- pogodna je za primenu kod postrojenja gde se ne koriste računarski sistemi za upravljanje (PLC), recimo kod delimičnih rekonstrukcija postrojenja.
- Koriste se postojeći resursi regulatora, interni regulatori brzine i momenta.
- Relativno je jednostavna za realizaciju.

Nedostaci upravljačke strukture „*master-slave*” su:

- frekventni pretvarači imaju različite uloge, tako da kod kvara na vodećem pretvaraču moraju da se menjaju parametri nekog od vođenih regulatora, kako bi on preuzeo ulogu vodećeg. Neki od proizvođača predviđaju više setova parametara, tako da se promenom seta parametara mogu relativno brzo i jednostavno promeniti uloge regulatora.
- ne postoji mogućnost daljinskog nadzora i potpuna dijagnostika stanja regulatora, na osnovu koje se može imati više informacija, ne samo o radu pogona, nego i celog sistema.

- ne mogu se ostvariti složenije varijante upravljanja, koje obezbeđuju kompenzaciju zazora, ili proklizavanja.

Odlike upravljačke strukture sa regulatorom srednje brzine u PLC-u su:

- svi pretvarači imaju istu ulogu, i u slučaju ispada jednog iz rada, ili ukoliko ne postoji potreba za njegovim radom, jednostavno se može isključiti.
- preko komunikacije sa PLC-om obezbeđuje se potpuni nadzor i kompletna dijagnostika nad regulatorima, a time i celim sistemom.
- u okviru regulatora brzine, a na bazi mogućnosti PLC-a moguća je implementacija različitih logičkih funkcija, u cilju realizacije naprednih upravljačkih struktura, koje obezbeđuju automatsku kompenzaciju zazora i proklizavanja. Ovo poslednje je od posebnog značaja kod transporterera, o čemu je bilo reči.

Nedostatak rešenja upravljanja sa regulatorom srednje brzine je neophodnost korišćenja programabilnog kontrolera (PLC-a) visokih performansi. Međutim, cena ovakvih kontrolera je daleko manja od cene pogona, tako da je kod izgradnje novih, ili rekonstrukcije postojećih transporterera sasvim opravdano predvideti takve kontrolere, jer pored upravljanja samim pogonom, oni obezbeđuju i kvalitetno upravljanje i nadzor nad celim transporterom, i njegovo sprezanje u BTO ili BTD sistem.

II.3.5. Osnovi proračuna tračnih transporterera

Proračun otpora kretanja i potrebne snage za pokretanje, rad u ustaljenom stanju i zaustavljanje tračnih transporterera definisani su standardom DIN 22101 [55]. U narednom tekstu biće opisane osnove proračuna otpora kretanja i potrebne snage pogona tračnog transporterera koji su obuhvaćeni navedenim standardom.

II.3.5.1 Otpori kretanja i potrebna snaga u ustaljenom radu

Snaga pogona tračnog transporterera u radu sa stalnom brzinom određena je otporima kretanja na nosećoj strani trake i na povratnoj strani trake. Otpori kretanja zavise od vrste i količine materijala koji se prenosi, konstrukcije na koju se traka oslanja, i profila trase koja je uslovljena konfiguracijom terena. Radi preciznijeg

proračuna ukupne sile za savladavanje otpora kretanju duž trake vrši se podela trake na segmente i određivanje sila otpora kretanju za svaki segment. Ukupna sila otpora kretanju trake dobija se sumiranjem sila za savladavanje otpora na pojedinim segmentima.

Mehanička snaga potrebna za savladavanje otpora kretanja koji se javljaju u toku rada tračnog transportera definisana je kao:

$$P_W = F_W \cdot v, \quad (2.1)$$

gde su:

P_W - ukupna mehanička snaga potrebna za pokretanje svih pogonskih bubnjeva sa obodnom brzinom v .

F_W - ukupna vučna sila na obodu pogonskih bubnjeva koja je u ustaljenom radu jednaka ukupnim otporima kretanja trake.

Kod tračnih transportera čije trase nisu horizontalne već imaju deonice sa usponima i padovima, i kod kojih je neravnomerna raspodela opterećenja duž trake, ukupni otpori kretanja u ustaljenom stanju mogu biti veći od izračunatih, zato se potrebna mehanička snaga svih motora izračunava prema F_{Wmax} :

$$F_{Wmax} = k \cdot F_W \geq F_W \quad k \geq 1, \quad (2.2)$$

$$P_{Wmax} \geq P_W. \quad (2.3)$$

U jednačini (2.2) k je „koeficijent sigurnosti”, koji se određuje na osnovu iskustva.

Potrebna mehanička snaga svih motora koji jednovremeno pokreću pogonske bubnjeve tračnog transportera koji rade u motornom režimu određena je sledećim izrazom:

$$P_{WmaxM} = \frac{F_{Wmax} \cdot v}{\eta}. \quad (2.4)$$

U slučaju trajnog rada u režimu kočenja potrebna mehanička snaga svih motora koji jednovremeno pokreću pogonske bubnjeve određena je kao:

$$P_{WmaxG} = F_{Wmax} \cdot v \cdot \eta, \quad (2.5)$$

gde je η stepen iskorišćenja pogonskog mehanizma koji obuhvata sve gubitke snage u prenosu od motora do pogonskog bubnja.

Za ukupnu nazivnu mehaničku snagu svih izabranih motora, usvaja se veća vrednost od potrebne mehaničke snage svih motora.

$$\Sigma P_{nmot} > P_{W \max M}, \quad (2.6)$$

ili

$$\Sigma P_{nmot} > P_{W \max G}, \quad (2.7)$$

zavisno od režima rada.

Potreban broj motora i nazivna snaga svakog pojedinačnog motora u pogonu tračnog transporterera mora da zadovolji sledeći uslov:

$$n_{mot} \cdot P_{nmot} = \Sigma P_{nmotM} > P_{W \max}, \quad (2.8)$$

$$n_{mot} \cdot P_{nmot} = \Sigma P_{nmotG} > P_{W \max}, \quad (2.9)$$

gde je:

n_{mot} - broj motora,

P_{nmot} - nazivna snaga jednog motora,

ΣP_{nmot} - ukupna mehanička snaga svih izabranih motora.

Otpori kretanja

U zavisnosti od konfiguracije terena i uslova rada na tračnom transporteru proračun otpora kretanja može se vršiti za tračni transporter u celini, ili se moraju vršiti proračuni za pojedine delove trake, odnosno segmente, posebno za noseću i povratnu stranu trake [58]. Ukoliko su uslovi rada i nagib trake isti po celoj dužini proračun se može vršiti za traku u celini. Kada na trasi postoje deonice sa različitim nagibom ili sa različitim uslovima rada, traka se prilikom proračuna deli na segmente po kriterijumu da su na svakom od segmenata uslovi rada odnosno nagib isti.

U ustaljenom režimu rada tračnog transporterera, otpori kretanja mogu se prema standardu DIN 22101 podeliti u četiri grupe otpora, prema sledećem izrazu:

$$F_W = F_H + F_N + F_{St} + F_S, \quad (2.10)$$

gde su:

F_H - primarni otpori kretanja trake,

F_N - sekundarni otpori kretanja trake,

F_{St} - otpori kretanja usled nagiba trase,

F_S - specijalni otpori kretanja kao dodatni otpori kretanja koji nastaju u posebnim uslovima.

Primarni otpori kretanja trake F_H

Primarni otpori kretanju trake koji se javljaju po njenoj dužini zavise od:

- mase i vrste materijala koji se trakom prenosi,
- konstruktivnih karakteristika same trake (masa i dužina trake),
- strukture na koju se traka oslanja (mase rolni na nosećoj i povratnoj strani trake),
- interakcije između trake i noseće strukture (koeficijent fiktivnog trenja),
- nagiba trase.

Primarni otpori kretanja se mogu izraziti prema sledećem izrazu za jedan segment trake:

$$F_{Hi} = \mu_i \cdot l_i \cdot g \cdot \left[M'_{Ri} + (M'_G + M'_L) \cdot \cos \delta_i \right], \quad (2.11)$$

odnosno za ceo tračni transporter:

$$F_H = \mu \cdot L \cdot g \cdot \left[M'_{RU} + M'_{RD} + (2 \cdot M'_G + M'_L) \cdot \cos \delta \right], \quad (2.12)$$

gde su:

i - indeks za označavanje segmenta trake;

μ_i, μ - fiktivni koeficijent trenja na segmentu, odnosno za ceo tračni transporter. Na osnovu radnih uslova i konstruktivnih karakteristika konvejera vrednosti koeficijenta trenja za proračun primarnih otpora kretanja kreću se u opsegu od 0,01 do 0,04.

l_i - dužina segmenta trake [m];

L - dužina između repa i glave tračnog transportera [m];

g - gravitaciono ubrzanje ($g=9,81 \text{ m/s}^2$);

M'_{Ri} - podužna masa rolni na segmentu trake [kg/m];

M'_{Ru} - podužna masa rolni na nosećoj strani trake [kg/m] određena je odnosom:

$$M'_{RU} = \frac{M_{RU}}{l_{RU}}$$

M_{Ru} - masa obrtnih delova lanca rolni na nosećoj strani trake [kg];

l_{Ru} - rastojanje između dva lanca rolni na nosećoj strani trake [m];

M'_{RD} - podužna masa rolni na povratnoj strani trake [kg/m] određena je odnosom:

$$M_{RD} = \frac{m_{RD}}{l_{RD}}$$

M_{RD} - masa obrtnih delova lanca rolni na povratnoj strani trake [kg];

l_{RD} - rastojanje između dva lanca rolni na povratnoj strani trake [m];

M'_G - podužna masa trake [kg/m];

M'_{Li} - podužna masa materijala na segmentu trake [kg/m], za segmente na povratnom delu trake;

M'_L - podužna masa materijala na celoj dužini tračnog transportera [kg/m];

$$M'_L = \frac{Q_n \cdot \rho \cdot \varphi_{st}}{v}$$

v - brzina tračnog transportera [m/s];

Q_n - teoretski kapacitet, zapreminski protok [m^3/h];

ρ - gustina transportovanog materijala [t/m^3];

φ_{st} - koeficijent korekcije zapreminskog protoka kod tračnog transportera sa nagibom dat je u sledećoj tabeli:

Tab. II-1 Koeficijent korekcije zapreminskog protoka kod tračnog transportera sa nagibom

Ugao nagiba δ	2°	4°	6°	8°	12°	12°	14°	16°	18°	20°
Koeficijent φ_{st}	1,0	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81

δ_i - ugao nagiba segmenta trake, koji se definiše kao ugao koji zaklapa podužna osa segmenta trake sa horizontalnom ravni [$^\circ$, *stepen*];

δ - ugao nagiba trase tračnog transportera u odnosu na horizontalnu ravan [$^\circ$, *stepen*].

Kada se proračun primarnih otpora kretanja vrši za različite segmente ukupni primarni otpori kretanja dobijaju se sabiranjem pojedinih otpora kretanja na segmentima.

Sekundarni otpori F_N kretanja trake

Sekundarni otpori kretanja F_N postoje samo na onim segmentima trake na kojima se vrši utovar i istovar materijala, a sastoje iz sledećih komponenti:

- dodatni otpori kretanju na repnom delu tračnog transportera, na kome se vrši presipanje materijala sa prethodnog tračnog transportera, kao posledica

razlike brzine kretanja. dolazećeg materijala i brzine tračnog transportera koji ga prihvata,

- otpori trenja između transportovanog materijala i bočnih strana utovarnih kolica,
- otpori trenja koji nastaju usled delovanja čistača trake,
- otpori koji nastaju usled savijanja trake oko pasivnih bubnjeva,
- otpori koji nastaju usled trenja u ležajevima pasivnih bubnjeva.

Sekundarni otpori kretanja trake mogu se uvažiti posredstvom korekcionog koeficijenta C .

$$C = 1 + \frac{F_N}{F_H} \quad (2.13)$$

U Tab. II-2 prikazane su vrednosti korekcionog koeficijenta C za opterećene tračne transportere u zavisnosti od ukupne dužine transportera L .

Tab. II-2 Korekциони koeficijent C za procenat popune trake između 70% i 110% prema DIN 22101 standardu

Dužina transportera L [m]	80	100	150	200	300	400	500
Koeficijent C	1,92	1,78	1,58	1,45	1,31	1,25	1,20
Dužina transportera L [m]	600	700	800	900	1000	1500	≥ 2000
Koeficijent C	1,17	1,14	1,12	1,10	1,09	1,06	1,05

Za veće dužine transportera veći su primarni otpori kretanja F_H i koeficijent C se smanjuje. Za velike dužine transportera ($L \geq 2000$ m) standardom DIN 22101 usvojena je vrednost korekcionog koeficijenta $C = 1,05$.

Za opterećene tračne transportere čija je dužina veća od 80m ($L > 80$ m), sekundarni otpori kretanja F_N mogu se približno odrediti pomoću sledeće relacije:

$$F_N = (C - 1) \cdot F_H. \quad (2.14)$$

Za opterećene i neopterećene tračne transportere čija je dužina manja od 80m ($L < 80$ m), sekundarni otpori kretanja određuju se pojedinačno.

Otpori kretanja usled nagiba trase F_{St}

Kada je konfiguracija terena sa visinskom razlikom između mesta utovara (deponovanja) i mesta pražnjenja, otpori kretanja koji su posledica gravitacije, kod većih nagiba trase, imaju značajan uticaj na vrednost ukupnih otpora kretanja a time i na vrednost potrebne vučne sile i snage tračnih transportera.

Otpori kretanja trake usled nagiba trase na jednom segmentu trake određeni su sledećom relacijom:

$$F_{Sti} = h_i \cdot g \cdot (M'_G + M'_{Li}), \quad (2.15)$$

h_i - visinska razlika između krajnjih tačaka segmenta trake,

$h_i > 0$ - kretanje trake u smeru uzbrdo,

$h_i < 0$ - kretanje trake u smeru nizbrdo.

Otpori kretanja usled nagiba trase tračnog transportera, ako je nagib konstantan i materijal ravnomerno raspoređen po dužini tračnog transportera mogu se izračunati po sledećem izrazu:

$$F_{St} = H \cdot g \cdot m'_L, \quad (2.16)$$

gde su:

H - visinska razlika između krajnjih tačaka tračnog transportera,

$H > 0$ - transportovanje materijala u smeru uzbrdo,

$H < 0$ - transportovanje materijala u smeru nizbrdo.

U prethodnom izrazu ne uzima se u obzir uticaj mase same trake, jer se dejstvo gravitacije na masu nosećeg dela trake poništava sa dejstvom gravitacije na masu povratnog dela trake.

Specijalni otpori kretanja F_S

Kao vid dodatnih otpora kretanja pri radu tračnog transportera mogu se javiti i specijalni otpori kretanja. U specijalne otpore kretanja spadaju sledeće vrste otpora:

- otpori kretanja za savladavanje ulazne rampe kod pretovarnih uređaja (utovarna kolica - *tripper* ili „S”voz - *hopper car*),
- otpori koji se javljaju kod kretanja kroz horizontalnu krivinu na rolnama pod nagibom,
- otpor na utovarnom mestu između materijala i bočnih stranica za usmeravanje materijala na izlazu iz utovarnog levka (utovarnih kolica),
- otpor na istovarnom mestu za bočni istovar između materijala i brisača (*scraper*) za bočno usmeravanje materijala sa trake,
- otpori usled ugiba trake između dva lanca nosećih rolni.

II.3.5.2 Otpori kretanja i vučna sila u nestacionarnim režimima rada

U nestacionarne režime rada tračnih transportera spadaju pokretanje i zaustavljanje. U toku pokretanja i zaustavljanja tračnih transportera, neophodne su dodatne komponente vučne sile radi savladavanja dodatnih komponenti otpora kretanja usled promene brzine. Ovi dodatni otpori kretanja se superponiraju sa osnovnim otporima kretanja koji postoje i u toku perioda pokretanja i zaustavljanja. U cilju uprošćenja određivanja otpora kretanja u praksi je usvojena pretpostavka da su osnovni otpori kretanja u toku pokretanja i zaustavljanja jednaki sa otporima kretanja u ustaljenom stanju F_W .

Komponenta sile usled promenljive brzine pri pokretanju transportera srazmerna je ukupnoj masi svih delova koji se pokreću, tj. ubrzavaju.

Dodatna komponenta otpora kretanja pri promeni brzine tračnog transportera definiše se za segment trake kao:

$$F_{ai} = a \cdot l_i \cdot \left[C_{Ri} \cdot M'_{Ri} + M'_G + M'_{Li} \right], \quad (2.17)$$

gde su:

C_{Ri} - koeficijent redukcije mase rolne zbog uvažavanja rotacionog kretanja rolne ($C_{Ri} \approx 0,9$);

a - koeficijent promene brzine (promena brzine u vremenu), $a > 0$ kod ubrzanja, $a < 0$ kod usporenja.

Dodatna komponenta otpora kretanja pri promeni brzine pri ravnomernoj raspodeli materijala duž cele trake može se napisati kao:

$$F_a = a \cdot \sum \left[l_i \left(C_{Ri} \cdot M'_{Ri} + M'_G + M'_{Li} \right) \right]. \quad (2.18)$$

Rezultujuća vučna sila na obodima svih pogonskih bubnjeva u toku pokretanja (2.19) tračnog transportera mora da savlada ukupne otpore kretanja definisane za ustaljeni režim rada tračnog transportera (2.10) i ukupne otpore kretanja definisane za pokretanje tračnog transportera ($a > 0$) (2.18),

$$F_{TrA} = F_W + F_{aA}, (F_{aA} > 0). \quad (2.19)$$

Rezultujuća vučna sila na obodima svih pogonskih bubnjeva u toku zaustavljanja ($a < 0$) određuje se relacijom (2.20),

$$F_{TrB} = F_W + F_{aB}, (F_{aB} < 0). \quad (2.20)$$

Pokretanje tračnog transportera

Značajna karakteristika za ubrzanje tračnog transportera u procesu pokretanja sa velikom silom zatezanja trake je faktor pokretanja p_A koji povezuje rezultujuću vučnu silu na obodima svih pogonskih bubnjeva u toku pokretanja F_{TrA} sa ukupnim otporom kretanja u stacionarnom stanju F_W :

$$p_A = \frac{F_{TrA}}{F_W}. \quad (2.21)$$

Prema preporukama standarda DIN 22101 veličina rezultujuće vučne sile na obodima svih pogonskih bubnjeva F_{TrA} u toku pokretanja tračnog transportera, posebno kod tračnog transportera sa velikom dužinom, treba da ispunjava sledeće uslove:

- da ne prelazi vrednost 1,7 puta veću od određenih otpora kretanja u ustaljenom stanju za najnepovoljniji slučaj (F_{Wmax}), tj. da faktor polaska bude $p_A \leq 1,7$ kako bi se izbegla neželjeno velika sila zatezanja u traci.
- da komponenta F_a u najnepovoljnijem režimu bude minimalno $0,2 F_{Wmax}$, i da vreme pokretanja ne pređe vremenski limit definisan termičkom zaštitom.

Pretpostavljajući vrednost faktora polaska tračnog transportera od 1,7, uz poznate vrednosti otpora kretanja u ustaljenom stanju F_W i mase, mogu se izračunati sledeće veličine:

- rezultujuća vučna sila na obodima svih pogonskih bubnjeva u toku pokretanja tračnog transportera

$$F_{TrA} = p_A \cdot F_W, \quad (2.22)$$

- ubrzanje u toku pokretanja

$$a_A = \frac{(p_A - 1) \cdot F_W}{\sum M}, \quad (2.23)$$

- ukupna sila ubrzanja

$$F_{aA} = (p_A - 1) \cdot F_W, \quad (2.24)$$

- vreme polaska

$$t_A = \frac{v}{a_A}. \quad (2.25)$$

Zaustavljanje tračnih transportera

Faktor zaustavljanja p_B određuje glavne karakteristike procesa zaustavljanja,

$$p_B = \frac{F_{TrB}}{F_W}. \quad (2.26)$$

Potrebna sila kočenja u toku procesa zaustavljanja tračnog transportera mora biti određena za najnepovoljnije uslove kočenja. Pri tome moraju biti definisani:

- dužina zaustavnog puta s_B ili
- vreme zaustavljanja t_B .

Sa datom dužinom zaustavnog puta mogu se odrediti:

- vreme zaustavljanja

$$t_B = \frac{s_B \cdot 2}{v}, \quad (2.27)$$

- koeficijent usporenja

$$a_B = \left| \frac{v}{t_B} \right|, \quad (2.28)$$

- komponenta sile usporenja

$$F_{aB} = a_B \cdot \sum M, \quad (2.29)$$

- rezultujuća vučna sila na obodima svih pogonskih bubnjeva u toku zaustavljanja tračnog transportera

$$F_{TrB} = F_W - a_B \cdot \sum M. \quad (2.30)$$

II.3.6. Osnovni principi projektovanja tračnih transportera

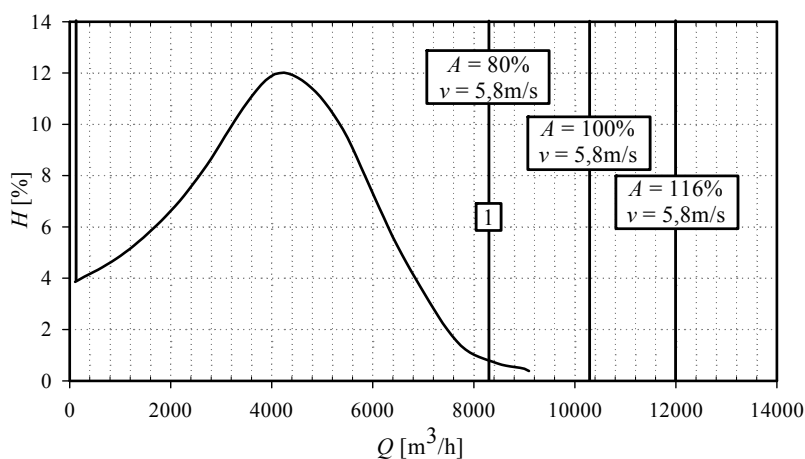
Za projektovanje i naručivanje tračnih transportera najbitnije je odrediti potrebni moment pogona trake, odnosno njegovu snagu. Postupak proračuna snage pogona trake dat je u poglavlju II.3.5. U ovom delu biće prikazani osnovni kriterijumi za dimenzionisanje mehaničkih sklopova i trake kod tračnog transportera sa regulacijom brzine.

Za dimenzionisanje tračnog transportera sa gumenom trakom danas se u svetu uglavnom koriste nemački DIN 22101 [55] i američki CEMA [56] standard. Kod oba standarda proračun kapaciteta tračnog transportera, polazi se od proračuna površine poprečnog preseka materijala na traci i usvojene (konstantne) brzine. Dimenzionisanje

kapaciteta tračnog transportera usvaja se u skladu sa maksimalnim (vršnim) kapacitetom bagera, uz povećanje kapaciteta zbog kontinuiteta protoka, odnosno povećanja zapremine zbog povećanja rastresitosti materijala.

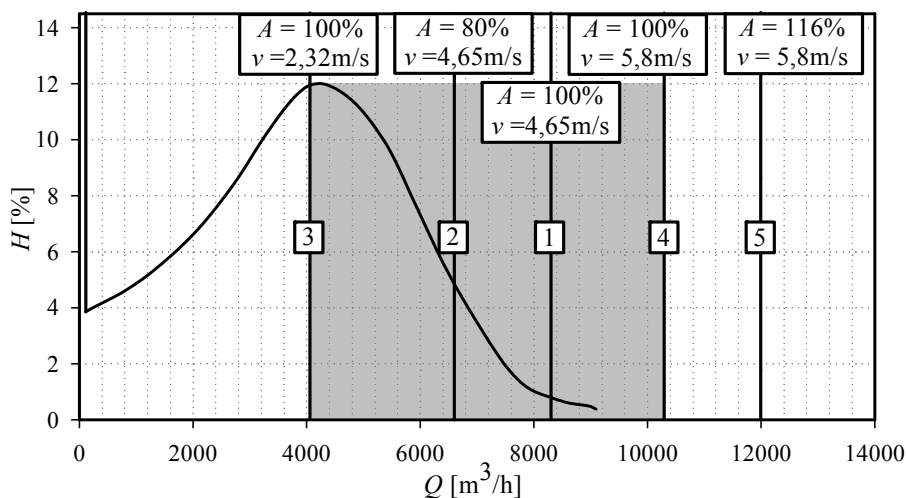
Način dimenzionisanja tračnog transportera sa konstantnom brzinom, tj. određivanje nazivne brzine trake biće objašnjeno na primeru jednog tračnog transportera koji ima traku širine 2000 mm i projektovan protok od 8300 m³/h. U skladu sa standardom DIN 22101, teorijska vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci se određuje za slučaj da je položaj gornjih nosećih rolni pod uglom od 36°. Za jedan tipičan slučaj tračnog transportera na površinskom kopu, usvojena je vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci od 80%, na osnovu koje se određuje nazivna vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci. Na osnovu ovoga i projektovanog kapaciteta, izračunava se potrebna brzina trake u iznosu od 5,8 m/s. Kapacitet koji odgovara teorijskoj vrednosti površine poprečnog preseka materijala na traci, pri ovoj brzini, iznosi 10300 m³/h.

Prema tome, kada površina poprečnog preseka dostigne 116% od teorijske vrednosti, transport se i dalje može obavljati a da ne dođe do presipanja materijala preko ivica trake, pri čemu bi kapacitet imao vrednost od 12000 m³/h. Slučaj raspodele relativnog vremena rada u toku godine za jedan tipičan tračni transporter prikazan je na Sl. II.26. Tokom najvećeg dela vremena, površina poprečnog preseka materijala na traci će se kretati u granicama od 50 do 60%, što znači da će tokom ovih perioda brzina tračnog transportera biti nepotrebno velika.



Sl. II.26 Određivanje nazivne brzine tračnog transportera sa konstantnom brzinom

Ako se uzme u obzir da savremeni pogonski sistemi mogu da rade efikasno sa brzinama u rasponu od 50 do 100% nazivne brzine, može se ostvariti trajni rad tračnog transportera u tom opsegu brzine. Kako bi se moglo garantovati ostvarenje vršnih kapaciteta, motor će (u kratkim vremenskim intervalima) raditi sa povećanjem brzine od 15 do 30% nazivne brzine motora. Vreme rada u tom opsegu ograničeno je zagrevanjem mašine, ali može biti dovoljno dugačko da pokrije potrebe trajanja vršnog kapaciteta. Princip regulacije protoka na tračnom transporteru je prikazana na Sl. II.27.



Sl. II.27 Određivanje nazivne brzine tračnog transportera sa promenljivom brzinom

Opseg promene brzine može se praktično prilagoditi statističkoj raspodeli zapreminskog protoka materijala u vremenu, tj. kapacitetu. Kako bi se olakšalo određivanje granica promene brzine, mogu se definisati radne tačke koje opisuju ključne vrednosti transporta sa promenljivom brzinom u poređenju sa tračnim transporterom sa konstantnom brzinom transporta.

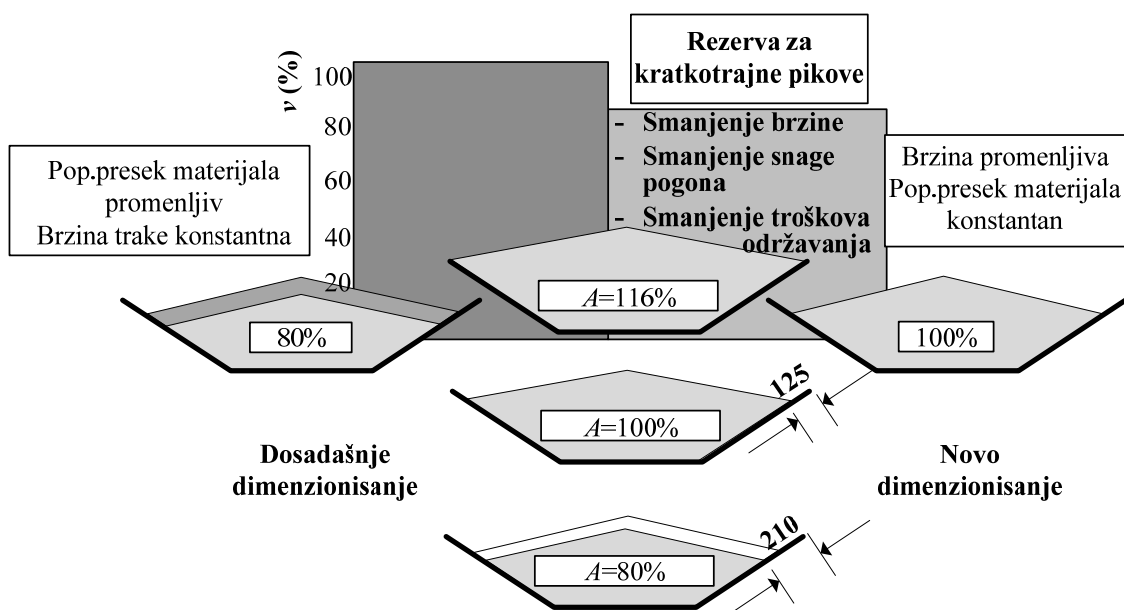
Tačka 1: Ovo je referentna tačka na Sl. II.26., koja odgovara kapacitetu od $8300 m^3/h$. Polazeći od činjenice da je verovatnoća rada u ovoj radnoj tački veoma mala, usvaja se da se ova vrednost kapaciteta ostvaruje pri nižoj brzini od $4,65 m/s$ (što predstavlja 80% nazivne brzine tračnog transportera koji radi sa konstantnom brzinom), ali sa 100% teorijske vrednosti površine poprečnog preseka materijala na traci.

Tačka 2: U ovoj tački je brzina ista kao i u tački 1, ali je površina poprečnog preseka materijala na traci oko 80%, po preporuci DIN 22101. Kapacitet koji odgovara ovoj tački u posmatranom primeru iznosi $6600 m^3/h$, a ostvaruje se pri nazivnoj brzini i

sa 80% teorijske vrednosti površine poprečnog preseka materijala na traci, po preporuci DIN 22101.

Tačka 3: Tačka 3 pokazuje mogućnost redukovanja brzine trake u slučaju manjih trenutnih kapaciteta ($> 50\%$ od nazivnog), čime se omogućava optimalno iskorišćenje površine poprečnog preseka. Ukoliko je trenutni kapacitet ispod 50% , brzinu trake ne treba dalje smanjivati.

Tačka 4: Tačka 4 karakteriše gornju granicu kontrole brzine koja se dostiže povećanjem brzine iznad nazivne vrednosti za 25% . U ovom slučaju brzina trake dostiže vrednost od $5,8 \text{ m/s}$. Na ovaj način ostvareni trenutni kapacitet odgovara maksimalnom kapacitetu bagera. Bager može da ostvari ove kapacitete veoma retko, a i tada samo u trajanju od nekoliko sekundi. Pogon treba da je u stanju da podnese ovakvo preopterećenje u trajanju od oko 10 minuta, na osnovu svog toplotnog kapaciteta. Sva oprema (elektro i mehanička) mora biti u stanju da podnese kratkotrajna preopterećenja koja se javljaju pri prekoračenjima brzine.

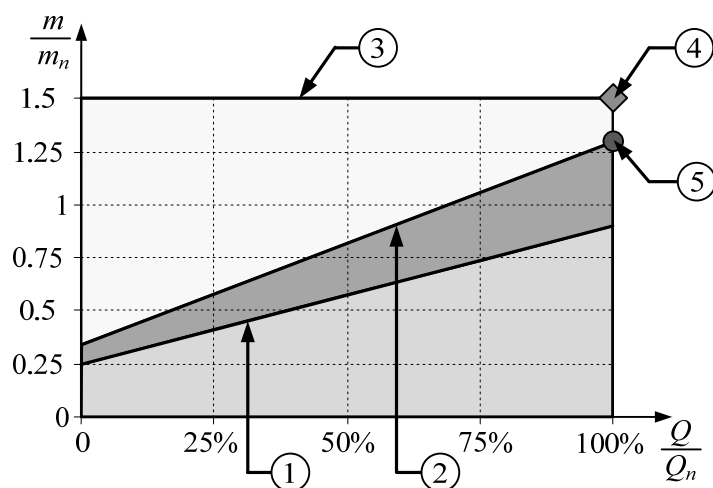


Sl. II.28 Površina poprečnog preseka materijala na traci kod tračnih transportera sa promenljivom brzinom

Tačka 5: Ova tačka je čisto od teorijskog značaja i predstavlja slučaj potpunog zauzimanja ukupne širine trake, od ivice do ivice, a da ne dođe do presipanja materijala preko ivica trake pri maksimalnoj brzini. Osenčena oblast na dijagramu na Sl. II.27 predstavlja opseg promene brzine tračnog transportera. Na Sl. II.28 je prikazan uporedni šematski prikaz odnosa površina poprečnih preseka materijala na traci kada se kapacitet

proračunava po DIN 22101 za 80% nazivne površine poprečnog preseka, i kada se površina poprečnog preseka računa u funkciji kontrolisane brzine.

Potreban moment za kretanje stalnom brzinom u zavisnosti od kapaciteta i popunjenosti trake (površina poprečnog preseka materijala na traci), je prikazan linijom 1 na Sl. II.29. Kod polaska je potrebno dodatno povećanje momenta zbog savlađivanja inercionih sila. Ovo povećanje je na Sl. II.29. prikazano površinom između linija 1 i 2. Ukupan, najveći moment koji je potreban kod promenljive brzine u zavisnosti od kapaciteta je prikazan linijom 2. Sa druge strane, kod konvencionalnih tračnih transportera, maksimalni momenat je jednak polaznom momentu koji zavisi od oblika mehaničke karakteristike motora, i načina pokretanja. Ovaj moment nije podesiv, ne zavisi od površine poprečnog preseka materijala na traci, i ne može se precizno kontrolisati, tako da je po pravilu veći od zaista potrebnog. Maksimalni moment kod konvencionalnog tračnog transportera je prikazan linijom 3 na Sl. II.29. Na osnovu izloženog sledi da je moment na koji treba dimenzionisati mehaničke sklopove i traku kod konvencionalnog tračnog transportera (pravougaonik 4) veći od momenta na koji treba dimenzionisati mehaničke sklopove i traku kod tračnog transportera sa promenljivom brzinom (tačka 5). Na bazi ove razlike obezbeđuje se određena ušteda u materijalu i investicijama kod izgradnje novih tračnih transportera.



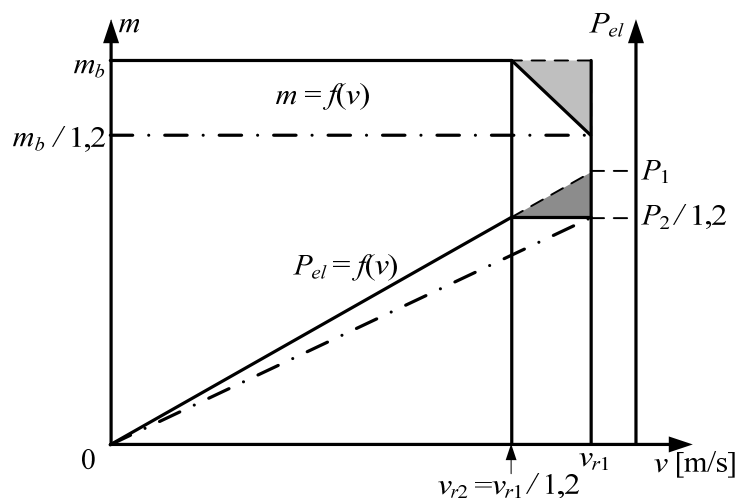
Sl. II.29 Potreban moment u funkciji kapaciteta u slučaju pogona sa stalnom i promenljivom brzinom.

Kod tračnih transportera sa konstantnim brzinama traka, potrebna instalisana snaga se određuje na osnovu maksimalnog kapaciteta za dati tračni transporter. Zbog

toga postoji direktna povezanost između brzine trake, maksimalnog kapaciteta i instalisane pogonske snage, (DIN 22101),

$$Q_n = A_n \cdot v, \quad (2.31)$$

gde je Q_n nazivni kapacitet, A_n nazivni presek materijala na traci, i v brzina trake. Q_n je kod tračnih transportera sa stalnom brzinom direktno zavisno od A_n . Kod tračnog transportera sa promenljivom brzinom A_n je približno stalno, tako da Q_n zavisi od brzine.



Sl. II.30 Zavisnost momenta i snage od brzine

Na Sl. II.30 prikazane su zavisnosti snage i momenta motora od brzine čime se ilustruje moguća ušteda na investicijama. Ako je za pokretanje trake potreban moment od m_d , pogonskom bubnju je potrebna snaga motora P_1 :

$$P_1 = m_b \cdot \frac{2}{D} \cdot v_{n1}, \quad (2.32)$$

gde je D prečnik pogonskog bubnja,

v_{n1} nazivna brzina trake.

Potreban prenosni odnos reduktora u ovom slučaju se određuje prema relaciji

(2.33),

$$I_1 = \frac{\pi}{30} n_{n \text{ mot}} \frac{1}{v_{n1}} \frac{D}{2}, \quad (2.33)$$

gde je $n_{n \text{ mot}}$ nazivna brzina motora;

I_1 prenosni odnos reduktora.

Na osnovu izloženih principa dimenzionisanja može se usvojiti nova, manja brzina za proračun snage pogona $v_{n1}=1,2 v_{n2}$. Za novu brzinu, a da bi se ostvario isti moment za pokretanje trake na pogonskom bubnju istog prečnika, potrebna je manja snaga P_2 ,

$$P_2 = m_b \cdot \frac{2}{D} \cdot v_{n2}. \quad (2.34)$$

Prenosni odnos reduktora u ovom slučaju mora da bude:

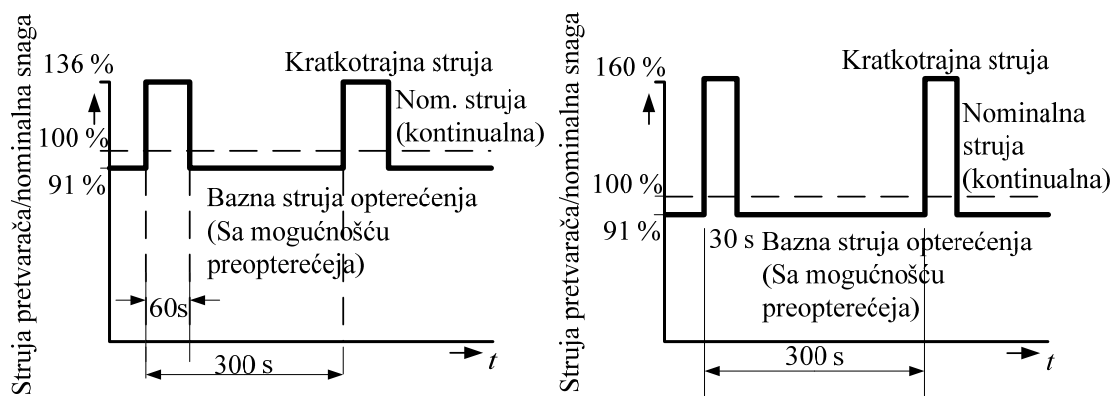
$$I_2 = \frac{\pi}{30} n_{n\ mot} \frac{1}{v_2} \frac{D}{2}. \quad (2.35)$$

Prema navedenim relacijama potrebna snaga za dimenzionisanje motora i reduktora je 1,2 puta manja, i njihova cena srazmerno tome manja. Prenosni odnos reduktora u drugom slučaju treba da bude 1,2 puta veći, što ne utiče na njegovu cenu.

Motor manje snage u opsegu brzina između v_{n2} i v_{n1} radi u režimu slabljenja polja, i to sa stalnom snagom. U ovom režimu, pri brzini v_{n1} i nazivnoj snazi, moment motora je manji od nazivnog 1,2 puta, i za isto toliko je manji i moment na pogonskom bubnju. Kako je snaga motora nazivna, motor može u ovom režimu da radi bez ograničenja. Imajući u vidu statističku raspodelu opterećenja, veća opterećenja se mogu očekivati vrlo retko, i to samo za vrlo kratko vreme. Ukoliko se pojavi potreba za maksimalnim momentom m_b , motor može da ostvari taj moment sa povećanjem snage 1,2 puta u odnosu na nazivnu za kratko vreme na račun svog toplotnog kapaciteta. Potrebno povećanje momenta i snage prikazano je na Sl. II.30 šrafiranim površinama. Standardni pogoni (motori i frekventni pretvarači) mogu da izdrže navedeno preopterećenja u trajanju od 10 min sa periodom od 60 min.

Posebnu pažnju treba posvetiti izboru frekventnog pretvarača za pogon trake. Imajući u vidu mnogo kraće vremenske konstante zagrevanja kod poluprovodničkih komponenti, odnosno značajno manji toplotni kapacitet, nazivna snaga frekventnog pretvarača treba da bude veća 1,3 puta od nazivne snage motora. Frekventni pretvarač treba da raspolaze i mogućnošću preopterećenja od 1,8 nazivne snage motora u trajanju od 10 s. Navedeni podaci se koriste u tenderskim dokumentima u Evropi, i kod naručivanja opreme za frekventne pretvarače. Proizvođači frekventnih pretvarača definišu na različite načine sposobnost preopterećenja svojih proizvoda. Na primer, ako bi se birao frekventni pretvarač iz serije ABB ACS800, da bi se zadovoljili navedeni

zahtevi trebalo bi izabrati frekventni pretvarač za prvu veću snagu, snagu od 1,3 nazivne snage motora, odnosno frekventni pretvarač za rad u teškim uslovima (*Heavy-duty use*), snage jednake snazi izabranog motora. Proizvođač ABB definiše režim „*Heavy-Duty use*” kao režim kontinualnog rada sa mogućnošću preopterećenja od 150% za 1 min svakih 5 min. SEMENS koristi dve definicije preopterećenja u zavisnosti od trajanja preopterećenja. Navedeni opšti uslovi sigurno će biti zadovoljeni ako se iz SIEMENS serije izabere frekventni pretvarač sa nazivnom snagom koja odgovara 1,3 snage motora (Sl. II.31).



Sl. II.31 Definicija preopterećenja za SIEMENS frekventni pretvarač

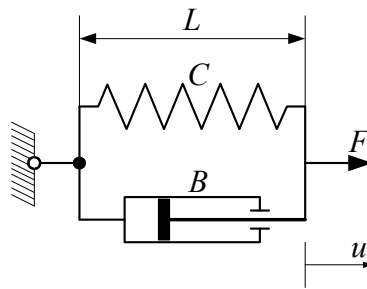
III. Matematički model trake

III.1. Dinamički model trake

Dinamički model tračnog transportera je potreban za analizu ponašanja trake u toku prelaznih (tranzijentnih) procesa, kao što su pokretanje, zaustavljanje sistema ili regulisanje brzine. Ukoliko se u fazi projektovanja tračnog transportera ne uradi pažljiva analiza ponašanja trake u prelaznim procesima i dobijeni rezultati ne uvažavaju pri projektovanju, u toku eksploatacije može doći do ozbiljnih problema i oštećenja opreme [32]. Postavljanje osnova za razvoj algoritma upravljanja sistemom tračnih transportera sa ciljem povećanja energetske efikasnosti, zahtevalo je razvoj preciznog dinamičkog modela tračnog transportera. Razvijen dinamički model primenjen je za analizu ponašanja u slučaju konkretnog tračnog transportera, koji predstavlja deo sistema tračnih transportera na V BTO sistemu površinskog kopa „Drmno”.

Ponašanje tračnog transportera u toku tranzijentnih stanja zavisi od mase materijala koji se trakom prenosi, od konstruktivnih karakteristika same trake, i strukture na koju se traka oslanja, od profila trase, a takođe i od karakteristika pogona trake. Parametri trake koji su od značaja za njeno dinamičko modelovanje su Young-ov modul elastičnosti i koeficijent viskoznosti kojima su definisane karakteristike trake [31].

Transporteri sa beskrajnim trakama spadaju u grupu višemotornih pogona čija su vratila u stalnoj mehaničkoj elastičnoj vezi preko elemenata koji su sastavni deo konstrukcije sistema [59]. Detaljan matematički model tračnog transportera omogućava analizu svih stanja i režima rada, i obuhvata pogonski sistem transportera, njegov mehanički deo i samu traku. U ovom delu će biti prikazan matematički model trake u kome je posebna pažnja posvećena elastičnoj prirodi trake. Da bi se napravio dobar model, traka se mora podeliti na segmente. Dužina i broj segmenata zavisi od potrebne preciznosti modela, i dužine trake. Pri modelovanju jednog segmenta koristi se model Kelvin-Voigt-ovog elementa [60], koji se može predstaviti pomoću modela kao što je prikazano na Sl. III.1.



Sl. III.1 Kelvin-Voigt-ov model

Jednačine koje predstavljaju matematički model Kelvin-Voigt-ovog elementa su:

$$f = f_c = C \cdot u + B \cdot \frac{du}{dt}, \quad (3.1)$$

$$C = \frac{E \cdot A}{L}, \quad (3.2)$$

$$B = \frac{\eta \cdot A}{L}, \quad (3.3)$$

gde su:

f – sila koja deluje na element predstavljen modelom na Sl. III.1 [N];

f_c – sila usled naprezanja-deformacije materijala [N];

E – Young-ov modul elastičnosti materijala [N/m²];

η – koeficijent viskoznosti materijala [N·s/m²];

u – promena dužine elementa [m];

L – dužina elementa merena duž ose delovanja sile [m];

A – površina preseka elementa upravno na osu delovanja sile [m²];

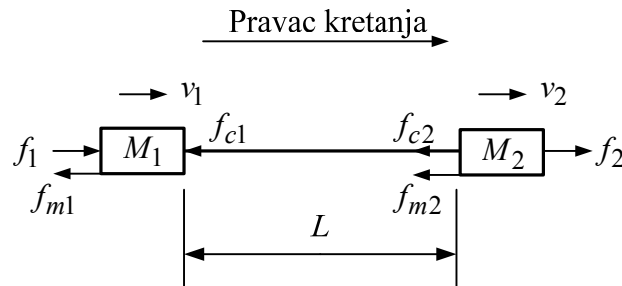
C – konstanta elastičnosti elementa [N/m];

B – konstanta viskoznosti elementa [N·s/m²].

U gornjem spisku korišćenih oznaka u uglastim zagradama su date jedinice u kojima se izražavaju navedene veličine u SI sistemu jedinica i mera.

Yung-ov modul (E) i koeficijent viskoznosti (η) su karakteristike materijala. Na osnovu izraza (3.1) i (3.3) sledi da konstante elastičnosti (C) i viskoznosti (B) zavise i od karakteristike materijala, i od geometrijskog oblika, odnosno dimenzija elementa. Ako bi u nekom opštem slučaju posmatrali sistem koga čine dva tela masa M_1 i M_2 , koja se kreću brzinama v_1 i v_2 respektivno (Sl. III.2), a koja su mehanički povezana preko štapa dužine L i površine poprečnog preseka A , sa zanemarljivom masom u odnosu na mase tela, moglo bi se zaključiti da na svako telo deluje po jedna spoljna sila f_1 i f_2 , a da

su otpori njihovom kretanju f_{m1} i f_{m2} respektivno. Skup jednačina koje opisuju kretanje u opisanom sistemu predstavljen je sa (3.4) do (3.9).



Sl. III.2 Sistem dva tela u mehaničkoj vezi

$$M_1 \frac{dv_1}{dt} = f_1 - f_{c1} - f_{m1}, \quad (3.4)$$

$$M_2 \frac{dv_2}{dt} = f_2 - f_{c2} - f_{m2}, \quad (3.5)$$

$$\frac{du_1}{dt} = v_1, \quad (3.6)$$

$$\frac{du_2}{dt} = v_2, \quad (3.7)$$

$$f_{c1} = C_{12}(u_1 - u_2) + B_{12}(v_1 - v_2), \quad (3.8)$$

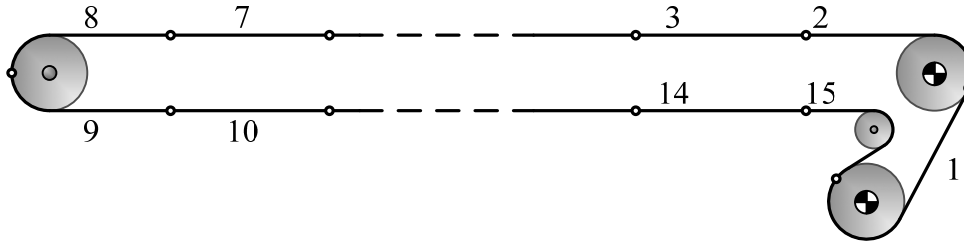
$$f_{c2} = C_{21}(u_2 - u_1) + B_{21}(v_2 - v_1). \quad (3.9)$$

U jednačinama od (3.4) do (3.9) korišćene su sledeće oznake:

- u_1 i u_2 pređeni putevi tela;
- v_1 i v_2 brzine tela;
- f_{c1} i f_{c2} sile usled naprezanja, deformacije štapa;
- C_{12} i C_{21} konstanta elastičnosti štapa;
- B_{12} i B_{21} konstanta viskoznosti štapa.

Diferencijalne jednačine (3.4) i (3.5) su Njutnove jednačine za pravolinijsko kretanje. Algebarske jednačine (3.8) i (3.9) definišu sile u materijalu koje nastaju pri njegovom naprezanju po osi kretanja sistema, a koje su definisane pomoću Kelvin-Voigt-ovog modela (3.1). Ove sile su srazmerne promeni dužine štapa koji povezuje tela, tj. razlici pređenih puteva posmatranih tela. Takođe, srazmerne su razlici brzina posmatranih tela. Konstante elastičnosti i viskoznosti u opštem slučaju mogu zavisiti od smera delovanja sila.

Da bi se traka modelovala korišćenjem opisanog Kelvin-Voigt-ovog modela, neophodno je prethodno izvršiti njenu podelu na segmente, kao što je prikazano na Sl. III.3.



Sl. III.3 Podela trake na 15 segmenata

Na Sl. III.3 segmenti 1 i 2 su pogonski, dok su ostali segmenti nepogonski. Na osnovu relacija od (3.4) do (3.9) može se postaviti opšti model za pojedine segmente. Prvi pogonski segment se nalazi između dva pogonska bubnja i njegova dužina je određena njihovim rastojanjem. Ovaj deo trake je znatno manje dužine u odnosu na njenu ukupnu dužinu. Takođe, rastojanje između zateznog bubnja i pogonskih bubnjeva se može smatrati zanemarljivim u odnosu na ukupnu dužinu trake, tako da se njena preostala dužina može podeliti na paran broj jednakih delova, od kojih je pola sa gornje, a pola sa donje strane trake. Kvalitetan model se može dobiti kada se usvoje značajno veće dužine segmenata u odnosu na rastojanje pogonskih bubnjeva, tako da će u posmatranom slučaju dužina 14 segmenata, L , biti veća od dužine prvog segmenta L_1 ($L \gg L_1$).

Opšti model pogona trake mora da uvaži mehaničke karakteristike trake, odnosno njenu elastičnost i viskoznost, dok se ostali elementi sistema mogu smatrati potpuno krutim (vratila i bubnjevi), a kod reduktora i spojnice može se zanemariti postojanje zazora. Opšti model prvog, pogonskog segmenta je predstavljen relacijama od (3.10) do (3.14):

$$M_{T1} \frac{dv_1}{dt} = f_{e1} - f_{c1} + f_{c15} - f_{m1}, \quad (3.10)$$

$$f_{c1} = C_1(\Delta u_1) + B_1(v_1 - v_2), \quad (3.11)$$

$$\frac{d\Delta u_1}{dt} = v_1 - v_2, \quad (3.12)$$

$$f_{m1} = f(M_{T1}, v_1), \quad (3.13)$$

$$f_{e1} = I \cdot \frac{2}{D} \cdot m_{e1}. \quad (3.14)$$

U relacijama (3.10) do (3.14) korišćene su sledeće oznake:

- M_{T1} masa trake prvog segmenta;
- v_1 linijska brzina prvog segmenta;
- v_2 linijska brzina drugog segmenta;
- f_{e1} pogonska sila na obodu bubnja;
- f_{c1} sila u traci usled deformacije - istežanja prvog segmenta;
- f_{c15} sila u traci usled deformacije - istežanja petnaestog segmenta;
- f_{m1} sila usled otpora kretanja, koja je funkcija mase koja se kreće i brzine [28], [58];
- Δu_1 promena dužine, istežanje prvog segmenta;
- C_1 konstanta elastičnosti prvog segmenta, prema (3.2);
- B_1 konstanta viskoznosti prvog segmenta, prema (3.3);
- m_{e1} ukupan elektromagnetni moment motora koji pokreću prvi pogonski bubanj;
- I prenosni odnos reduktora;
- D prečnik pogonskog bubnja.

Opšti model drugog pogonskog segmenta predstavljen je relacijama od (3.15) do (3.19). U ovim jednačinama konstante koje se odnose na traku: masa, elastičnost i viskoznosti, nisu indeksirane jer zavise od dužine segmenta, a dužina ovog segmenta je jednaka sa dužinama svih ostalih segmenata (osim prvog).

$$(M_T + m_{m2}) \frac{dv_2}{dt} = f_{e2} - f_{c2} + f_{c1} - f_{m2} \quad (3.15)$$

$$f_{c2} = C(\Delta u_2) + B(v_2 - v_3) \quad (3.16)$$

$$\frac{d\Delta u_2}{dt} = v_2 - v_3 \quad (3.17)$$

$$f_{m2} = f(M_T + m_{m2}, v_2) \quad (3.18)$$

$$f_{e2} = I \cdot \frac{2}{D} \cdot m_{e2} \quad (3.19)$$

U relacijama od (3.15) do (3.19), pored već navedenih, korišćene su sledeće oznake:

- M_T masa trake jednog segmenta;

m_{m2} trenutna masa materijala na drugom segmentu;
 v_3 linijska brzina trećeg segmenta;
 f_{e2} pogonska sila na obodu bubnja;
 f_{c2} sila u traci usled deformacije - istezanja drugog segmenta;
 f_{m2} sila usled otpora kretanja, koja je funkcija mase koja se kreće i brzine;
 Δu_2 promena dužine, istezanje drugog segmenta;
 C konstanta elastičnosti segmenta, prema (3.2);
 B konstanta viskoznosti segmenta, prema (3.3);
 m_{e2} ukupan elektromagnetni moment motora koji pokreću drugi pogonski bubanj.

Opšti model i -tog nepogonskog segmenata na gornjoj strani trake, na kojoj je i materijal može se predstaviti relacijama od (3.20) do (3.23), pri čemu je $i=3 \div k$, gde je $k \leq 8$ broj segmenta na koji se deponuje materijal.

$$(M_T + m_{mi}) \frac{dv_i}{dt} = -f_{ci} + f_{ci-1} - f_{mi} \quad (3.20)$$

$$f_{ci} = C(\Delta u_i) + B(v_i - v_{i+1}) \quad (3.21)$$

$$\frac{d\Delta u_i}{dt} = v_i - v_{i+1} \quad (3.22)$$

$$f_{mi} = f(M_T + m_{mi}, v_i) \quad (3.23)$$

Opšti model i -tog nepogonskog segmenata na donjoj strani trake, $i = 8 - k$ segmenata sa gornje strane trake, na kojoj nema materijala, može se predstaviti relacijama od (3.24) do (3.27), pri čemu je $i=k+1 \div 15$.

$$M_T \frac{dv_i}{dt} = -f_{ci} + f_{ci-1} - f_{mi} \quad (3.24)$$

$$f_{ci} = C(\Delta u_i) + B(v_i - v_{i+1}) \quad (3.25)$$

$$\frac{d\Delta u_i}{dt} = v_i - v_{i+1} \quad (3.26)$$

$$f_{mi} = f(M_T, v_i) \quad (3.27)$$

Pored već objašnjenih oznaka u izrazima od (3.24) do (3.27) korišćene su i sledeće oznake:

m_{mi} trenutna masa materijala na i -tom segmentu;
 v_i brzina i -tog segmenta;

- f_{ci} sila u traci usled deformacije - istezanja i -tog segmenta;
 f_{mi} sila usled otpora kretanja na i -tom segmentu;
 Δu_i promena dužine, istezanje i -tog segmenta.

Masa materijala koji se transportuje je vrlo bitna promenljiva u posmatranom sistemu. Materijal može biti na različite načine raspoređen po gornjem delu trake, što zavisi od načina izvršenja procesa u kome radi posmatrani transporter. U slučaju transportovanja rastresitog materijala, masa materijala na posmatranom segmentu zavisi od trenutne zapremine materijala raspoređenog po dužini segmenta, koja se može odrediti pomoću (3.28),

$$V_i = \int A_{ul\ i} v_i dt - \int A_{iz\ i} v_i dt + V_{i0} = \int (A_{ul\ i} - A_{iz\ i}) v_i dt + V_{i0}. \quad (3.28)$$

U izrazu (3.28) korišćene su sledeće oznake:

- V_i trenutna zapremina rastresitog materijala na i -tom segmentu;
 $A_{ul\ i}$ trenutna površina poprečnog preseka materijala na početku i -tog segmenta;
 $A_{iz\ i}$ trenutna površina poprečnog preseka materijala na kraju i -tog segmenta;
 v_i trenutna brzina i -tog segmenta;
 V_{i0} zapremina materijala na i -tom segmentu u početnom trenutku.

Izračunavanje zapremine materijala na jednom segmentu prema (3.28) zahteva poznavanje podatka o površini poprečnog preseka na početku i na kraju segmenta u svakom trenutku. Podatak o trenutnoj vrednosti površine poprečnog preseka materijala na početku segmenta na koji se vrši deponovanje materijala je nezavisno promenljiva veličina, i u realnom slučaju dobija se merenjem trenutne količine materijala koji se deponuje na traku.

U sistemima gde se koristi transportovanje materijala beskrajnim trakama, vrši se merenje trenutnog kapaciteta, na osnovu čega se određuje učinak celog sistema. Metode merenja trenutnog kapaciteta zavise od načina deponovanja materijala. Kapacitet je transportovana količina materijala u jedinici vremena, a trenutni kapacitet $Q(t)$ se dobija na osnovu (3.29). Kada se materijal na početak segmenta doprema stalnom brzinom (v_{const}), onda je površina poprečnog preseka materijala na mestu

dopremanja srazmerna trenutnom kapacitetu materijala koji se doprema, tj. deponuje na početak posmatranog segmenta (3.29),

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} = A(t) \cdot v(t) = A(t) \cdot v_{const} \sim A(t). \quad (3.29)$$

Podatak o kapacitetu dobijen na ovaj način je u ovom slučaju A_{ul} . Podatak o površini poprečnog preseka na kraju segmenta se ne može odrediti na isti način, on se mora izračunati. Izračunavanje se vrši „praćenjem” kretanja materijala duž segmenta u vremenu. Ovo se može uraditi postupkom diskretizacije, tako što se segment podeli na manje delove, podsegmente čija je dužina L_{ps} . Dužina ovih podsegmenta određuje se tako da se može smatrati da je po celoj dužini podsegmenta, površina poprečnog preseka materijala stalna. Podatak o površini preseka materijala na jednom podsegmentu smešta se u memoriju, tj. registar. Broj registara R je određen sa (3.30),

$$R = \frac{L}{L_{ps}} \in \mathbb{N}. \quad (3.30)$$

U relaciji (3.30) figurišu:

R broj podsegmenta;

L dužina segmenta;

L_{ps} dužina podsegmenta.

Svaki segment koji se nalazi na gornjoj strani trake, odnosno na kome se nalazi materijal, u modelu se predstavlja jednim nizom registara kojih ima R . Upisivanje podataka u registre vrši se u skladu sa vremenom odabiranja koje odgovara vremenu za koje traka pređe dužinu od L_{ps} . Trenutak upisivanja t_o (odabiranja) se određuje pomoću logičkog bloka sa resetabilnim integratorom, a prema relaciji (3.31), gde je v trenutna vrednost brzine segmenta. Resetabilni integrator se resetuje kada promenljiva *trigger* promeni vrednost sa 0 na 1. Pošto su brzine segmenata različite, zbog pojednostavljenja je dovoljno tačno koristiti brzinu prvog segmenta za određivanje trenutka odabiranja.

$$trigger = \begin{cases} 0 & \int v dt < L_{ps} \\ 1 & \int v dt = L_{ps} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$t_o = t \quad akko \quad trigger = 1$$

Registre treba organizovati u niz, tako da se u trenutku odabiranja u prvi registar upisuje nova vrednost, a ranije upisane vrednosti se pomeraju u naredni registar.

Prema definiciji redosleda segmenata na Sl. III.3, materijal se deponuje na i -ti segment, tj. neki od segmenata od 2 do 8, i u prvi registar niza registara koji pripadaju ovom segmentu upisuje se vrednost površine poprečnog preseka koja odgovara količini materijala koja se deponuje u trenutku odabiranja,

$$A_{iul} = \frac{Q(t_o)}{v(t_o)}. \quad (3.32)$$

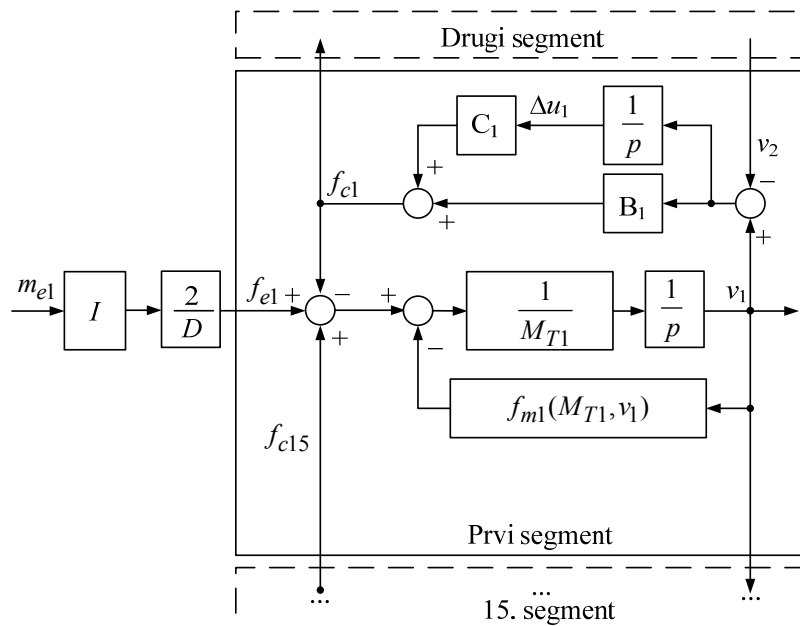
U prvi registar nizova narednih segmenata, upisuju se vrednosti koje su bile u poslednjem registru niza registara prethodnih segmenata, posmatrano u smeru kretanja materijala, kao što je prikazano u jednačini (3.33) za dva susedna segmenta i i $i-1$,

$$A_{(i-1)ul} = A_{iz}. \quad (3.33)$$

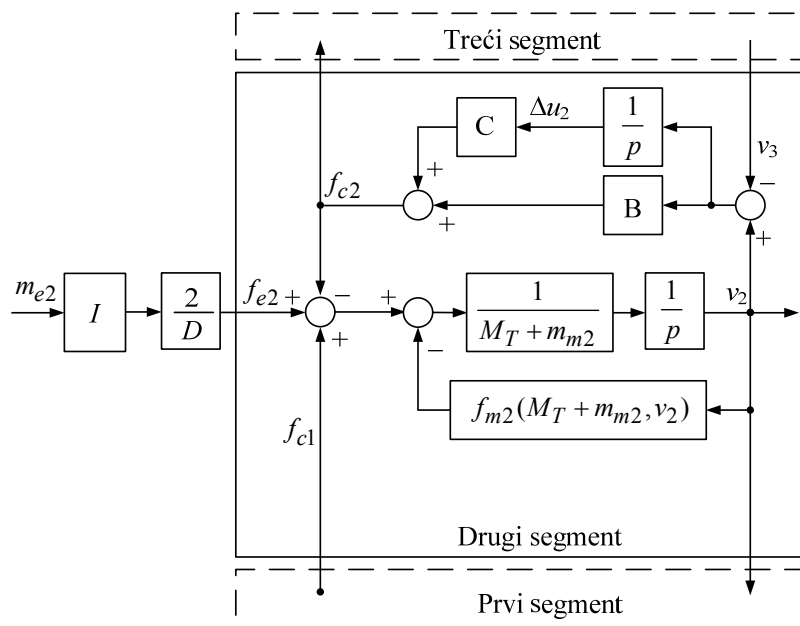
U jednačini (3.33) je i redni broj segmenta na gornjoj strani trake ($i < M$). Zapremina materijala na segmentu (V_i) dobija se pomoću relacije (3.34). Množenjem ovako dobijene vrednosti sa specifičnom masom materijala koji se transportuje, dobija se ukupna masa materijala na segmentu (M_i).

$$\begin{aligned} V_i &= \int v \cdot (A_{ul i} - A_{iz i}) dt + V_{i0} \\ M_i &= V_i \cdot \gamma \end{aligned} \quad (3.34)$$

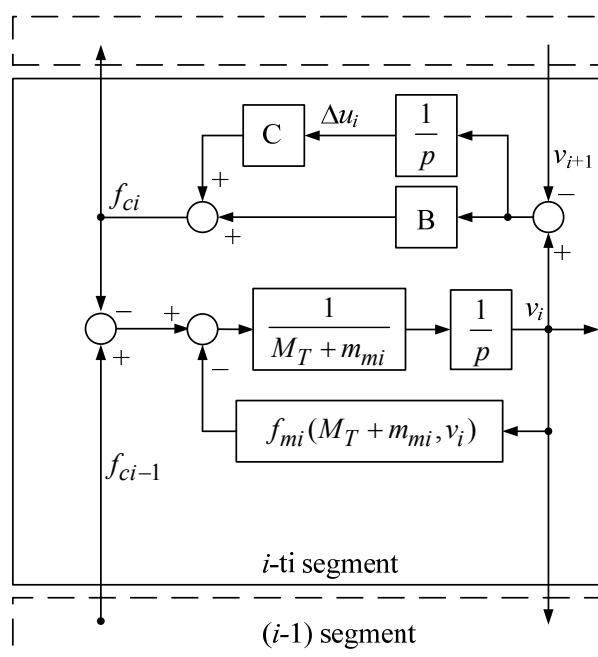
Na Sl. III.4 je prikazan blok dijagram modela prvog pogonskog segmenta, a na Sl. III.5 je blok dijagram modela drugog pogonskog segmenta. Na Sl. III.6 i Sl. III.7 su prikazani blok dijagrami modela ne pogonskih segmenata.



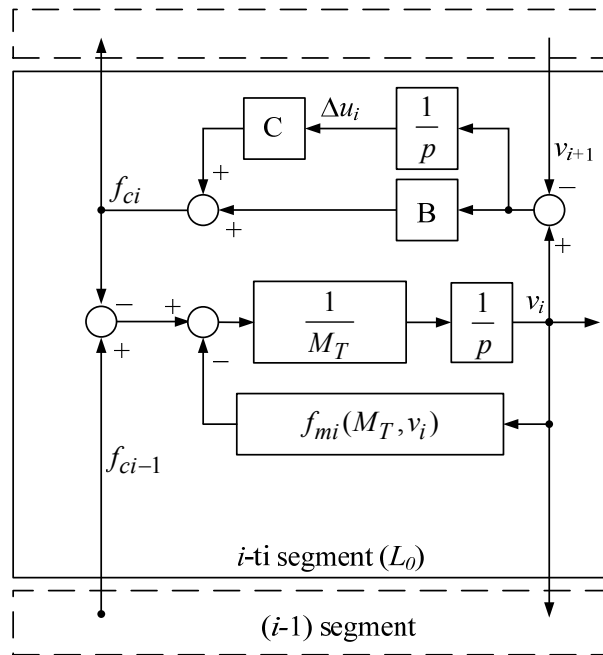
Sl. III.4 Model prvog pogonskog segmenta



Sl. III.5 Model drugog pogonskog segmenta



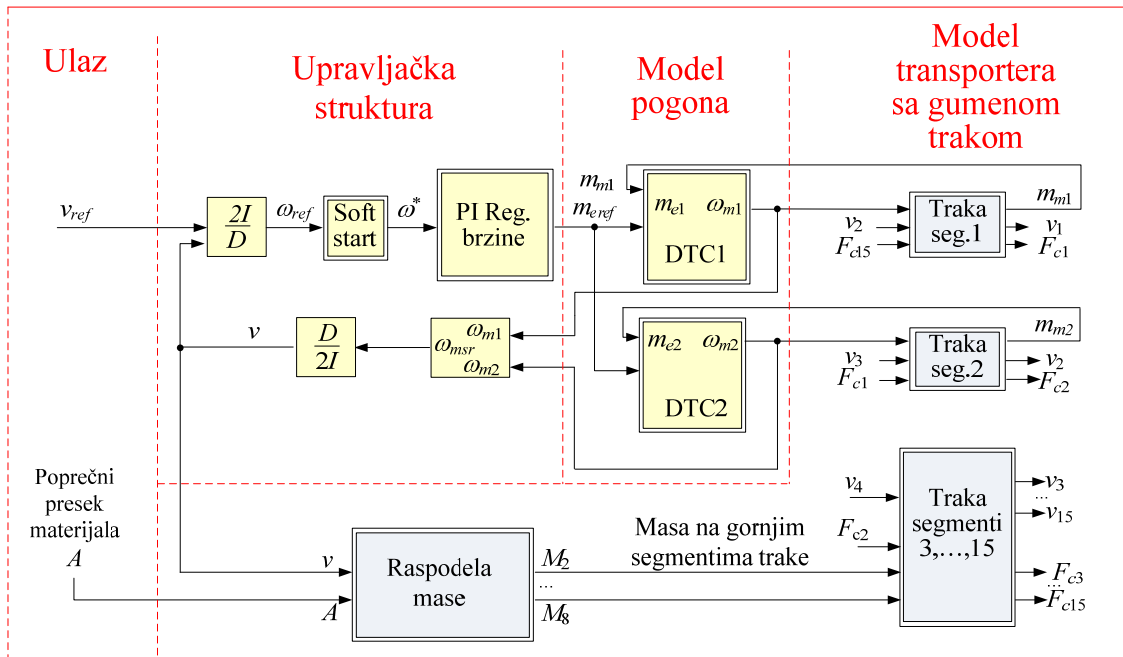
Sl. III.6 Model nepogonskog segmenta na gornjoj strani trake na kome ima materijala



Sl. III.7 Model nepogonskog segmenta na kome nema materijala

III.2. Dinamički model tračnog transportera u MATLAB *Simulink*-u i njegova verifikacija pomoću rezultata merenja na terenu

Dinamički model trake realizovan je u MATLAB *Simulink*-u. Blok dijagram osnovne strukture prikazan je na Sl. III.8.



Sl. III.8 Blok dijagram osnovne strukture dinamičkog modela tračnog transportera

Na prikazanom blok dijagramu naznačene su celine koje predstavljaju: ulaz u dati model, upravljačku strukturu, model pogona, model transportne trake koja je podeljena na 15 segmenata i deo u kome se vrši raspodela mase na gornjim segmentima trake.

Ulazi u sistem su zadata brzina trake i trenutna količina materijala koja se deponuje na traku, tj. površina poprečnog preseka materijala na presipnom mestu koja se deponuje sa prethodne trake. Zadata (referentna) vrednost brzine trake je u slučaju da se radi o sistemu tračnih transportera koji se kreće konstantnom brzinom, jednaka nazivnoj vrednosti, a to je upravo slučaj za koji se vrši verifikacija modela. Ovo je ulaz u deo modela koji je označen kao „Upravljačka struktura”, a u potpunosti odgovara regulatoru srednje brzine realizovanom u PLC-u tračnog transportera, koji je predstavljen u poglavlju II.3.4 i na Sl. II.25.

Deo blok dijagrama koji je označen kao „Model pogona” predstavlja model dva motora u krutoj mehaničkoj vezi koji predstavljaju pogon gornjeg pogonskog

bubnja, a napajaju se iz frekventnih pretvarača kod kojih je primenjena direktna kontrola momenta (blok DTC1, Sl. III.8). Na isti način modelovan je i pogon donjeg pogonskog bubnja (blok DTC1, Sl. III.8). Prikazani blok dijagram omogućava simulaciju rada pogona sa dva, tri ili četiri pogonska motora.

Preostali deo blok dijagrama prikazanog na Sl. III.8, označen kao „*Model transportera sa gumenom trakom*”, u potpunosti je modelovan kao što je to detaljno prikazano u poglavlju III.1., relacijama od (3.10) do (3.27), i na Sl. III.4 do Sl. III.7. Potrebno je naglasiti da su sile srazmerne otporima kretanju svakog segmenta, označene sa f_{mi} ($i=1, \dots, 15$) u relacijama (3.10) do (3.27) i na Sl. III.4 do Sl. III.7, u potpunosti modelovane prema odgovarajućem proračunu za sile otpora kretanju tračnog transportera, koji je detaljno prikazan u poglavlju II.3.5. Svi potrebni parametri pogona, mehaničke konstrukcije i same trake analiziranog prvog veznog tračnog transportera u V BTO sistemu, učitavaju se pomoću posebnog m fajla u radnu memoriju (*workspace*) *Matlab-a*, a pre startovanja simulacije.

U cilju dobijanja što preciznije simulacije realnog procesa, na ulaz u simulacioni model dovedena je prethodno snimljena merena vrednost površine trenutnog poprečnog preseka materijala na traci. Da bi se izvršila verifikacija modela, merenja su vršena pri startu neopterećenog i opterećenog trećeg tračnog transportera u nizu od pet. Parametri modela prikazanog blok dijagramom na Sl. III.8, prilagođeni su parametrima konkretnog tračnog transportera. Realni sistem se sastoji od pet tračnih transportera, od kojih su prva dva etažna, na njih bager deponuje jalovinu koju oni dalje transportuju konstantnom brzinom ka trećem i četvrtom, koji predstavljaju vezne tračne transportere do poslednjeg petog, koji predstavlja odlagališni tračni transporter. Vezni i odlagališni tračni transporter mogu da imaju promenljivu brzinu transporta materijala, dok to nije slučaj sa etažnim tračnim transporterima. Na kraju druge etažne trake nalazi se senzor kojim se vrši merenje površine poprečnog preseka materijala $A(t)$ i to je kao što je već rečeno, jedino mesto gde se vrši merenje ove veličine, što je bio jedan od razloga zašto je treća traka izabrana za verifikaciju modela. U slučaju da se merenje površine poprečnog preseka materijala vrši na bageru, ne bi postojala potreba da se etažne trake kreću konstantnom brzinom, već bi se i one kretale promenljivom brzinom.

Merena trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na kraju druge trake se učitava pomoću m fajla u radnu memoriju (*workspace*) *Matlab-a* i odatle

se vrši njena raspodela po gornjim segmentima trake, počevši od 8. segmenta i završivši sa 2. segmentom, na način prikazan u poglavlju III.1, jednačinama od (3.28) do (3.34), i blokom „*Raspodela mase*” na Sl. III.8. Pre početka simulacije starta trećeg tračnog transportera, izvršena je početna raspodela materijala na traci. Ovo je učinjeno u posebnom modelu (*mdl* fajl), čija je to i jedina svrha, raspodela mase po segmentima na opisani način. Na ulaz u ovaj model se dovodi izračunata trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na početku četvrte trake, dobijena iz arhive SCADA sistema. Izračunavanje se vrši „praćenjem” kretanja materijala duž segmenta u vremenu, kao što je opisano u poglavlju III.1. Ova početna raspodela materijala na traci traje onoliko dugo, koliko je potrebno materijalu da pređe put dužine trećeg tračnog transportera ako se kreće nazivnom (konstantnom) brzinom. Zatim se pomoću novog *m* fajla vrši pamćenje dobijene raspodele materijala na trećoj traci kao početno stanje svih registara koji odgovaraju podsegmentima segmenata trake (poglavlje III.1), i tek se onda vrši novo učitavanje merene trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na kraju druge trake i startuje simulacija. Ulazni podaci za trenutnu vrednost površine poprečnog preseka materijala na kraju druge trake (tj. početku treće trake) i na početku četvrte trake, učitavaju se u odgovarajuće simulacione modele od istog početnog trenutka.

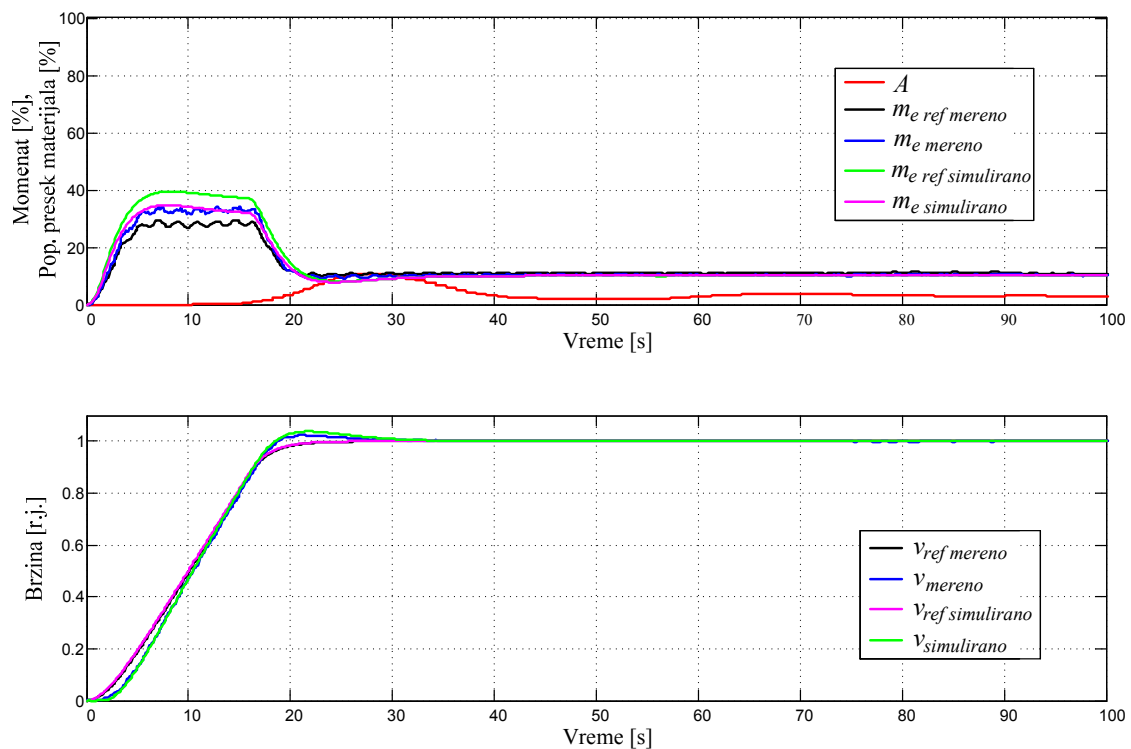
Rezultati simulacije zajedno sa rezultatima merenja u slučaju starta prazne trake ($A(t) < 10\%$) prikazani su na Sl. III.9. Rezultati simulacije zajedno sa rezultatima merenja u slučaju starta opterećene trake prikazani su na Sl. III.10.

Na Sl. III.9 i Sl. III.10 prikazane su karakteristične trenutne vrednosti pogona trake pri zaletanju trake od nulte do pune brzine dobijene simulacijom, i eksperimentalno snimljene na transporteru sa regulisanim pogonima. Na prikazanim vremenskim dijagramima se može videti dobro slaganje rezultata što potvrđuje da se pažljivim modelovanjem na opisani način može dobiti dobar model pogona, na kome se mogu vršiti različite analize.

Osnovni podaci o tračnom transporteru koji je korišćen kao primer za izvedene simulacije i na kome su vršena merenja, su:

- dužina tračnog transportera $L_{conv}=2\cdot 1120$ m,
- širina trake 2000 mm,
- debljina trake 30,6 mm,

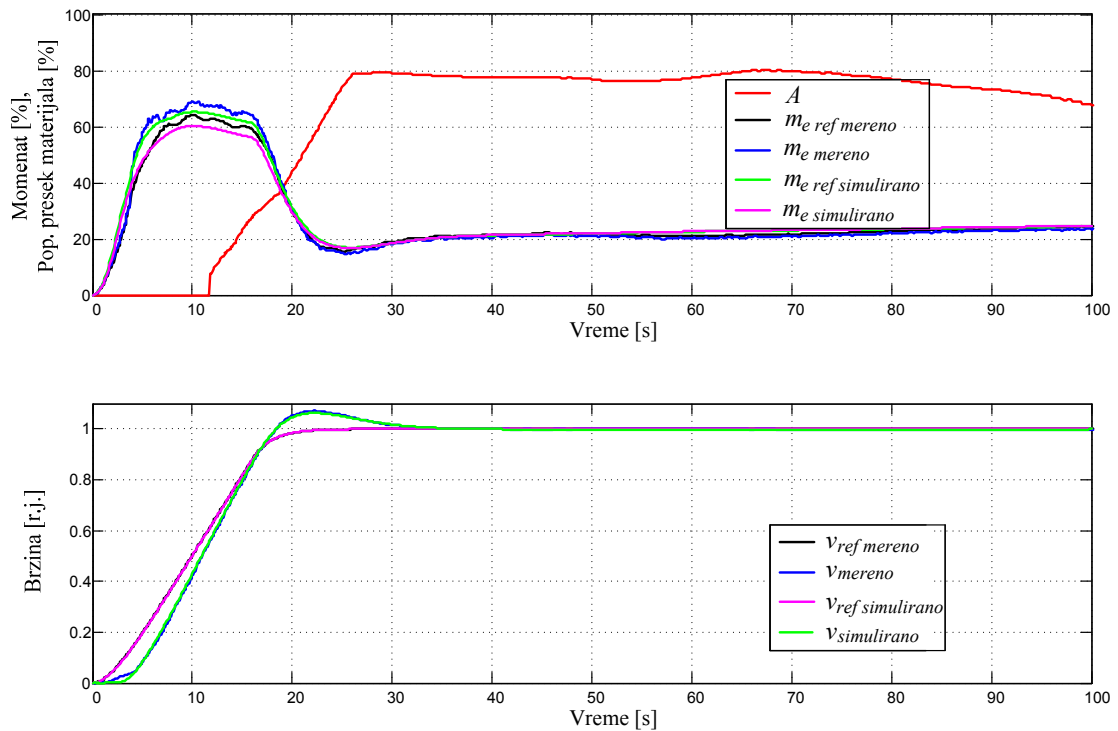
- dužina segmenta $L=160$ m,
- dužina podsegmenta $L_{ps}=10$ m,
- podaci o traci $C = 1,6875 \cdot 10^9$ N/m, $B = 4972500$ Ns/m (empirijski određena vrednost),
- pogon 3×1000 kW, 995 o/min,
- prečnik pogonskog bubnja 1,5 m,
- prenosni odnos reduktora 17,267,
- specifična težina materijala $\gamma=1600$ kg/m³.



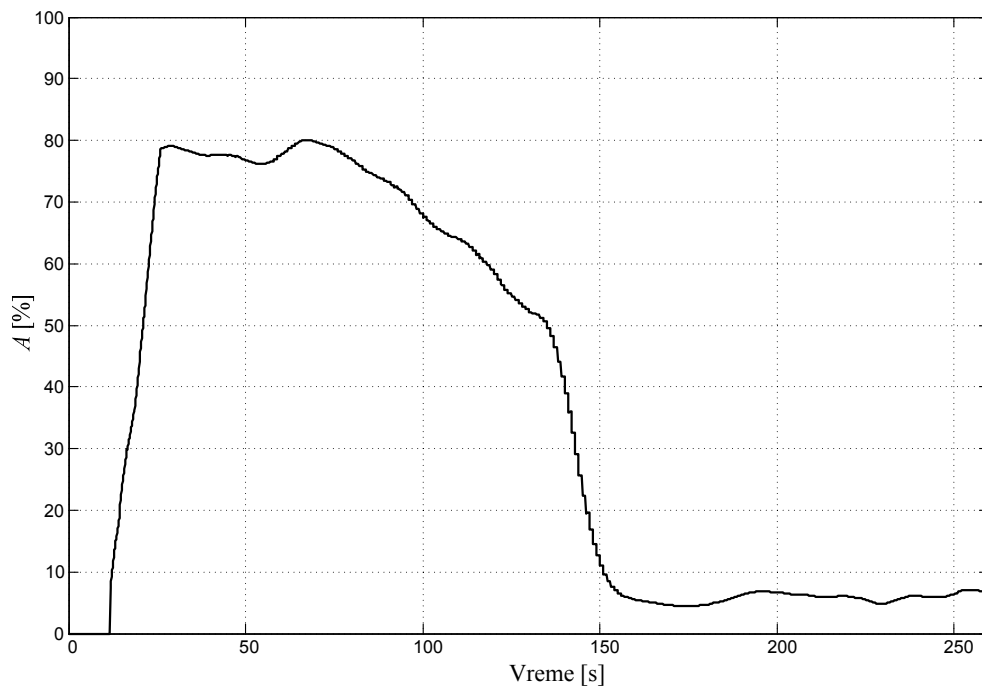
Sl. III.9 Poređenje rezultata simulacije sa rezultatima merenja u slučaju starta neopterećenog tračnog transportera

Sa ciljem da se pojasni raspodela materijala koji se transportuje duž trake, vremenski dijagram trenutne površine poprečnog preseka materijala koji je snimljen na analiziranoj trećoj traci, prikazan je na Sl. III.11. Odgovarajuća raspodela tog istog materijala duž trake, posmatrana u vremenskom intervalu potrebnom da materijal stigne do kraja trake ako se kreće konstantnom brzinom koja je jednaka nazivnoj ($t = L_{conv} / (2 \cdot v_n)$), prikazana je na Sl. III.12. U donjem delu Sl. III.12 prikazano je 7 segmenata na gornjem, nosećem delu trake, a u gornjem delu 112 podsegmenta, svaki

dužine 10m, na kojima se može smatrati da je površina poprečnog preseka materijala konstantna.

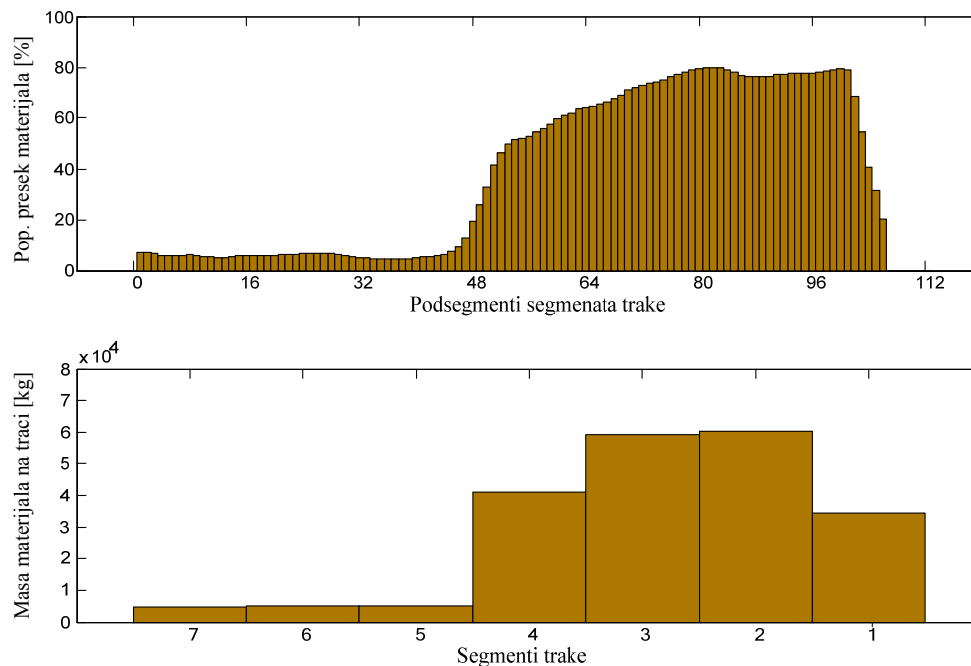


Sl. III.10 Poređenje rezultata simulacije sa rezultatima merenja u slučaju starta opterećenog tračnog transportera



Sl. III.11 Vremenski dijagram trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala snimljen na kraju druge trake

Pri implementaciji dinamičkog modela u MATLAB *Simulink*-u, različiti delovi modela su diskretizovani sa različitom periodom odabiranja, u cilju verne prezentacije stanja u realnom sistemu. Korak integracije u modelu je izabran da bude 1ms, dok je ciklus izvršavanja regulatora brzine u PLC-u na tračnom transporteru 50ms.



Sl. III.12 Raspodela materijala duž trake:
prikaz podele trake na segmente i podsegmente

Prilog III-1

Podaci o sistemu tračnih transportera:

Broj tračnih transportera: 5
Ukupna instalisana snaga 20 MW
Trenutna dužina: 7,5 km

Podaci o tračnom transporteru:

Širina trake 2000 mm;
Broj instalisanih pogonskih motora 4;
Broj instalisanih frekventnih pretvarača 4;
Vrsta pogona: asinhroni kavezni motori napajani iz frekventnih pretvarača sa DTC
Maksimalna dužina 3,25 km;
Nazivna brzina 4,65 m/s
Nazivni kapacitet 6600 m³/h

Podaci o motorima:

Napon: 690 V; Sprega statorskog namotaja: Δ
Snaga: 1000 kW / 995 rpm; Radni ciklus: S1, ED 100%
Stepen korisnog dejstva: 96,50%; Faktor snage: 0,837
Struja: 1036 A; Moment: 9600 Nm

Podaci o frekventnom pretvaraču:

ABB ACS 800 -07 -1740-7, $P_{hd} = 1000\text{kW}$, sa forsiranim vazдушnim hlađenjem
Niskonaponski frekventni pretvarač za teške uslove rada $U_n = 690\text{V}$:
2 ispravljачka modula (12-pulsni diodni most), 3 invertorska modula i dva čoperska modula za električno kočenje povezanih na jednosmerne sabirnice

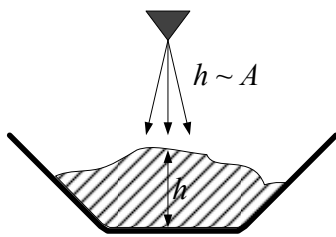
Podaci o PLC-u:

ABB PLC – AC 800 F sa 32-bit procesorom, modularne strukture.
Napajanje 120/230 V AC, 24 V DC, Ethernet modul 10BaseT, Profibus modul 12MBit/s

IV. Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera

IV.1. Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja

Regulisanje brzine tračnog transportera zahteva raspolaganje sa podatkom o količini materijala koji se deponuje na traku, odnosno poznavanje trenutnog kapaciteta. Pomoću ultrazvučnih senzora može se utvrditi količina materijala na traci, tačnije površina poprečnog preseka materijala na osnovu visine preseka, kao što je pokazano na Sl. IV.1.



Sl. IV.1 Merenje trenutne površine poprečnog preseka materijala na traci

Trenutni kapacitet je dat izrazom (3.29), iz koga se može zaključiti da je pri konstantnoj brzini trake srazmeran trenutnoj površini poprečnog preseka materijala na traci. Brzina trake na koju se deponuje materijal treba da se menja saglasno sa izrazom (1.4) da bi se ostvario ranije definisani kriterijum upravljanja brzinom. Međutim, kako je pokazano na Sl. I.3 trenutni kapacitet se menja, u širokim granicama od 0 do 100%, ponekad vrlo naglo. Što znači da bi brzinu trebalo povećavati i smanjivati na isti način kako se menja i trenutni kapacitet. Ovi dinamički procesi bi bili nepovoljni po mehaničke sklopove tračnog transportera, naročito za traku, jer bi mogli da dovedu do dodatnih naprezanja.

Zbog toga što se trenutni kapacitet menja, a te promene se ne mogu predvideti, algoritam upravljanja mora biti takav da se brzina trake prilagođava uslovima na početku tračnog transportera, tj. na mestu merenja trenutnog kapaciteta. Algoritam za generisanje referentne brzine pogona trake se definiše na sledeći način:

1. Teorijska brzina trake se izračunava na osnovu izraza (1.4) i može se u slučaju svakog pojedinačnog tračnog transportera izraziti na sledeći način:

$$v_t(t) = \frac{A_{ul}(t)}{A_n} v_{ul}(t) \quad (4.1)$$

U (4.1), $A_{ul}(t)$ i $v_{ul}(t)$ su trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala koji dospeva na traku sa prethodne trake (dolazeća količina materijala) i trenutna brzina prethodne trake.

Stvarna referentna brzina pogona trake $v_{ref}(t)$ se izračunava na bazi izraza (4.1) prema izrazu (4.3), pod uslovima definisanim u izrazu (4.2),

$$\frac{dv_t(t)}{dt} \geq 0 \quad \wedge \quad v_t(t) - v_{ref}(t) \geq \varepsilon, \quad (4.2)$$

$$v_{ref}(t) = c \int (v_t(t) - v_{ref}(t)) dt + v_{ref}(t_1), \quad (4.3)$$

gde je: t_1 trenutak kada su se stekla oba uslova definisana izrazom (4.2), c recipročna vrednost vremenske konstante integratora brzine (izražena je u $[s^{-1}]$), dv_t/dt [$\%v_n/s$] i ε [$\%v_n$].

2. Kada uslovi iz (4.2) nisu ispunjeni, tj.,

$$\frac{dv_t(t)}{dt} < 0 \quad \vee \quad v_t(t) - v_{ref}(t) < -\varepsilon, \quad (4.4)$$

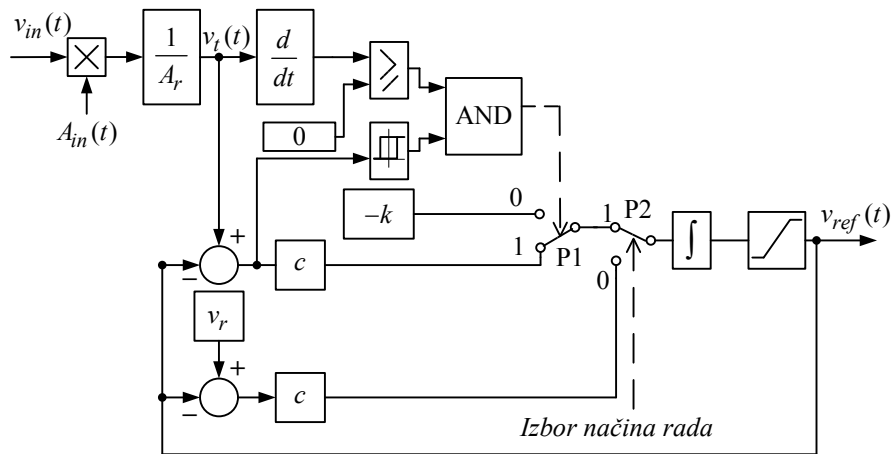
stvarna referentna brzina se određuje na osnovu izraza (4.5)

$$v_{ref}(t) = v_{ref}(t_2) - k \cdot (t - t_2), \quad (4.5)$$

gde je t_2 trenutak kada je prestao da važi bar jedan od uslova iz (4.2), a k je koeficijent usporenja.

Unošenjem opsega tolerancije postiže se da se promena znaka v_{ref} (prelaz sa usporenja na ubrzanje ili obrnuto) vrši samo u slučajevima kada razlika teorijske i referentne brzine izlazi iz opsega tolerancije definisanog vrednošću promenljive ε , a u skladu sa ispunjenjem uslova koji je vezan za izvod teorijske brzine. U slučajevima kada se razlika referentne i teorijske brzine nalazi unutar opsega tolerancije definisanog vrednošću promenljive ε , stanje prekidača P1 se neće promeniti.

Blok dijagram opisanog algoritma je prikazan na Sl. IV.2 .



Sl. IV.2 Algoritam za generisanje referentne brzine tračnog transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja

Kada pogon tračnog transportera radi sa promenljivom brzinom, tada je prekidač P2 u položaju „1”. U periodu kada se povećava količina materijala koja dolazi na tračni transporter, referentna brzina pogona se određuje prema (4.3), i pogon tada ubrzava. Konstanta c određuje dinamiku promene referentne brzine. Na ovaj način se povećava površina poprečnog preseka materijala na traci čija se brzina podešava, odnosno teži ka A_n . Kada dolazeća količina materijala opada, tada se referentna brzina izračunava na osnovu relacije (4.5), tj. brzina opada sa koeficijentom usporenja k . Opseg promene brzine je ograničen, jer nema opravdanja da se brzina tračnog transportera smanjuje ispod 50% nazivne brzine. Maksimalna brzina se podešava na 100 - 125%, u zavisnosti od kapaciteta bagera i uslova rada. Ovde je razmatran opseg promene brzine od 50% do 100% nazivne brzine.

Ukoliko se želi da tračni transporter ima stalnu i nazivnu brzinu, tada se pomoću signala „Izbor načina rada” izabere stanje prekidača P2 „0”, i tada se referentna brzina određuje pomoću izraza (4.6).

$$v_{ref}(t) = c \int (v_n - v_{ref}(t)) dt + v_{ref}(t_3) \quad (4.6)$$

Na Sl. IV.2, prekidačem P1 upravlja logički sklop prema uslovima definisanim u (4.2). Kao što je već rečeno, učinak celog sistema se određuje na osnovu merenja trenutnog kapaciteta. Kada se materijal na početak trake doprema stalnom brzinom (v_{const}) onda je površina poprečnog preseka materijala na presipnom mestu srazmerna trenutnom kapacitetu materijala koji se doprema. U tom slučaju, kapacitet koji se dobija

proporcionalan je $A_{ul}(t)$. Ako to nije slučaj, tj. materijal se doprema na početak trake brzinom koja nije konstantna, nego je rezultat algoritma prikazanog na Sl. IV.2, onda površina poprečnog preseka materijala na presipnom mestu mora da se izračuna u skladu sa zakonom o održanju kapaciteta (3.29), za presipno mesto između dva tračna transportera i i $i-1$, prema (4.7),

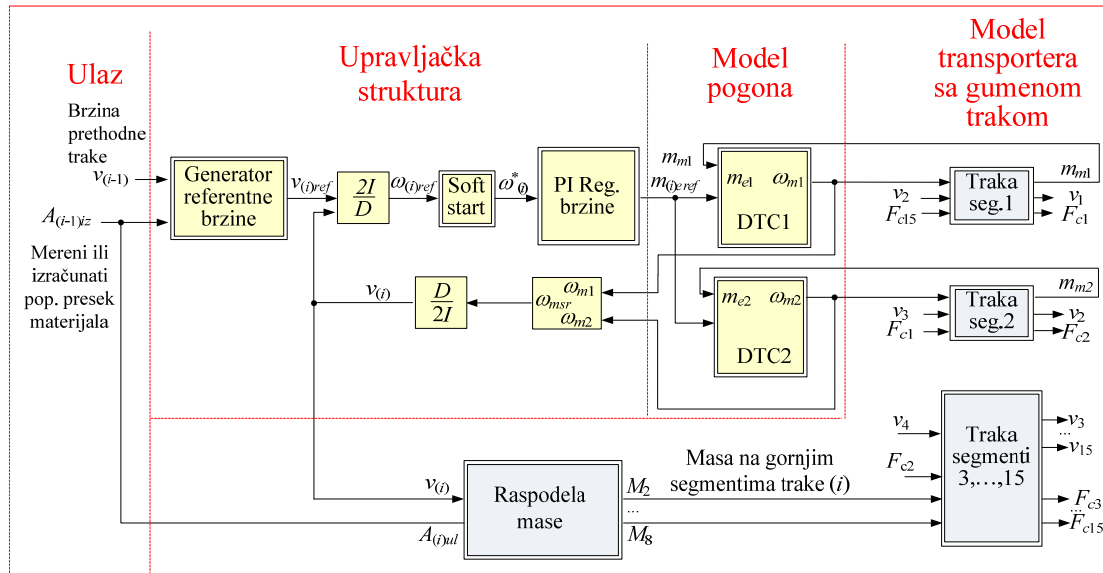
$$A_{(i)ul}(t) = \frac{A_{(i-1)iz}(t)}{v_{(i)}(t)} \cdot v_{(i-1)}(t). \quad (4.7)$$

Trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na kraju $(i-1)$ -og tračnog transportera ($A_{(i-1)iz}(t)$) mora da bude poznata, da bi se na osnovu (4.7) mogla da odredi trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na početku i -tog tračnog transportera ($A_{(i)ul}(t)$). Vrednost za $A_{(i-1)iz}(t)$ se može meriti odgovarajućim senzorom ili se može dobiti izračunavanjem, odnosno, „praćenjem” kretanja materijala duž segmenta trake u vremenu, kao što je to opisano u poglavlju III.1, izrazima od (3.29) do (3.33), sa tom razlikom što se u jednačini (4.7) indeks i odnosi na mesto trake u BTO sistemu, dok se u jednačinama (3.32) i (3.33) isti indeks odnosi na mesto segmenta u nizu segmenata na gornjoj strani trake.

Konstanta k , prikazana na Sl. IV.2, određuje dinamiku usporenja pogona koja mora biti usklađena sa dinamičkim karakteristikama pogona. Naglo usporenje nepovoljno utiče na sve mehaničke sklopove, spojnice, ležajeve, traku itd. Pogoni tračnih transportera čija trasa nije sa nagibom obično koriste kočenje sa otpornikom i čoperom u jednosmernom kolu. Naglo usporenje dovelo bi do aktiviranja sistema za električno kočenje, čime bi se energija kočenja nepotrebno pretvarala u otpornicima u toplotu. U skladu sa navedenim uslovima i ograničenjima, za vrednost konstante k usvojena je empirijski određena vrednost u toku puštanja u rad realnog sistema, u iznosu od $0,1$ [% v_n /s], što za konkretni slučaj iznosi $0,00465$ m/s². Prikazani algoritam sa konstantnim koeficijentom usporenja, razvijen je i testiran na dinamičkom modelu tračnog transportera, koji je prikazan u poglavlju III.1 i III.2.

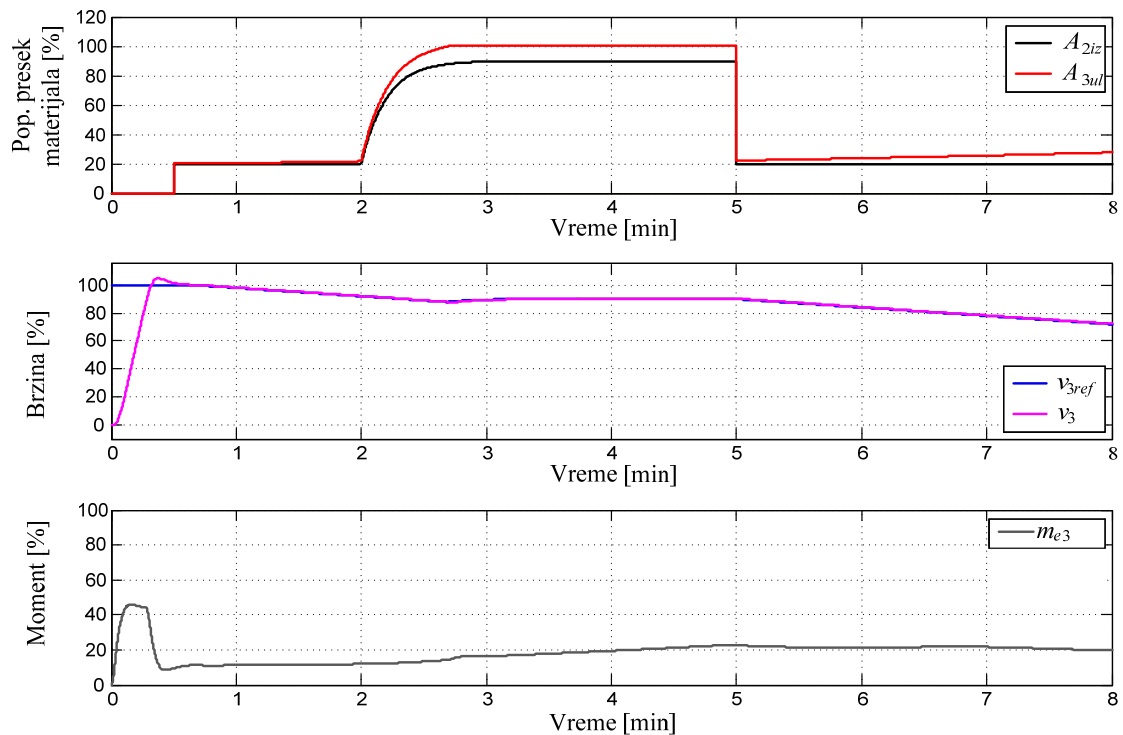
Ovde će biti prikazana dva karakteristična slučaja koja najbolje ilustruju opisani algoritam, a dobijena su simulacijama na modelu prikazanom na Sl. IV.3. Rezultati simulacija su dobijeni uvođenjem realnih ograničenja sistema u model, u vidu uslova pod kojima je vršena simulacija. Zbog već navedenih razloga u poglavlju III.2, pri implementaciji dinamičkog modela tračnog transportera u MATLAB *Simulink* -u, i

ovde su simulacije vršene na modelu prvog veznog, tj. trećeg tračnog transportera. Površina poprečnog preseka materijala, koja se meri na kraju drugog tračnog transportera, označen je sa $A_{(2)iz}$.



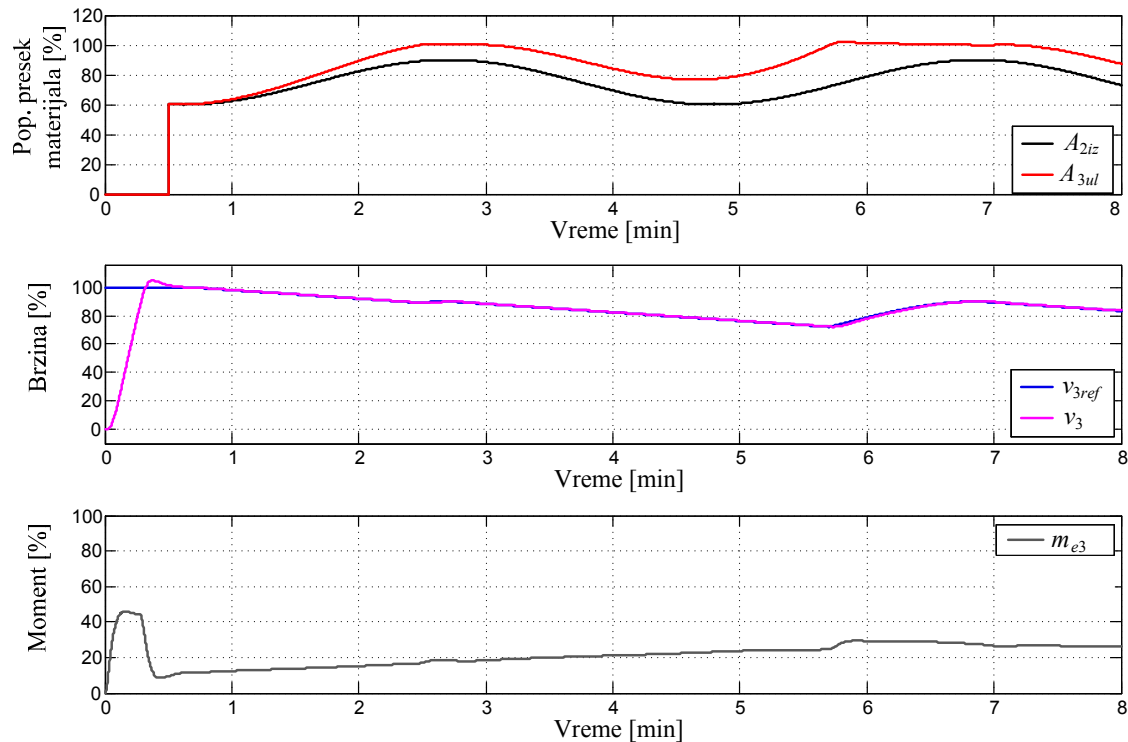
Sl. IV.3 Blok dijagram dinamičkog modela tračnog transportera sa primenjenim algoritmom za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera (blok - generator referentne brzine)

Prvi slučaj koji se razmatra je sledeći: tračni transporter sa površinom poprečnog preseka dolazećeg materijala čija je vrednost od početne jednake nuli porasla na $A_{2iz} = 20\%$ (nazivne vrednosti), zaleće se iz stanja mirovanja do pune - nazivne brzine ($v_{3ref} = 100\%$). Zatim se u trenutku $t = 40s$ uključuje upravljanje brzinom (prekidač P2 u položaju „1”, Sl. IV.2); površina poprečnog preseka dolazećeg materijala se povećava na $A_{2iz} = 90\%$, i na kraju, trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala se naglo smanjuje na početnu vrednost $A_{2iz} = 20\%$. Rezultati simulacije prikazani su na Sl. IV.4. Iz prikazanih rezultata simulacije može se zaključiti da se za porast trenutne vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na treću traku, razmatranim algoritmom za generisanje referentne brzine ostvaruje potrebno ubrzanje, sa ciljem da se izbegne presipanje materijala preko ivica trake. Takođe se datim algoritmom sa konstantnim koeficijentom usporenja, ostvaruje takvo smanjenje brzine, koje ni u slučaju iznenadnog pada trenutne vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na treću traku, neće dovesti do aktiviranja električnog kočnja.



Sl. IV.4 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri upravljanju referentnom brzinom primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja: prelazni proces pri prelazu iz rada sa stalnom brzinom u rad sa promenljivom referentnom brzinom, pri promeni površine poprečnog preseka dolazećeg materijala od početne vrednosti jednake nuli na $A_{2iz} = 20\%$ (nazivne vrednosti), a zatim sa 20% na 90% nazivne vrednosti i obrnuto

U drugom testu primenjenog algoritma na dinamičkom modelu tračnog transportera, trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na treću traku sadrži sinusnu komponentu $A_{2iz}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t)$. Ovaj oblik za trenutnu vrednost dolazećeg materijala na traku izabran je sa ciljem da se simulira način na koji bager deponuje materijal na traku. Ponovo, prikazani rezultati simulacije na Sl. IV.5 pokazuju da popunjenost trake teži maksimalnoj, tj. nazivnoj vrednosti. Ova vrednost se ne postiže zbog toga što smanjenje brzine ne prati u potpunosti smanjenje trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na traci, ali se time izbegava aktiviranje električnog kočenja u svim režimima rada, osim u slučaju bezbednosnog isključenja, tj. isključenja u slučaju nužde. Što je koeficijent usporenja k manji, to je odstupanje popunjenosti trake od maksimalne vrednosti veće.



Sl. IV.5 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri upravljanju referentnom brzinom primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja: prelazni proces iz rada sa stalnom brzinom u rad sa upravljanjem referentnom brzinom pri sinusnoj promeni dolazećeg materijala

Iz rezultata simulacija prikazanih na Sl. IV.4 i Sl. IV.5, takođe se može primetiti da je trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci A_{3ul} ponekad veća od 100%, što predstavlja maksimalnu teorijsku vrednost. Čak i kada trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci dostigne 116%, transport materijala se i dalje može odvijati bez presipanja materijala preko ivica trake, kao što je objašnjeno u poglavlju II.3.6 i u literaturi [28], [61].

IV.1.1. Modifikovani algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja

Iz razloga objašnjenih u prethodnom poglavlju (IV.1), opisani algoritam za generisanje referentne brzine sa empirijski određenim koeficijentom $k = 0,1$ [% v_n/s], ne obezbeđuje potpunu popunjenost trake, a ni dovoljno smanjenje potrošnje električne energije. U cilju poboljšanja algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera, moraju se razmotriti druge opcije za modifikaciju algoritma, kao i metode za egzaktnije određivanje koeficijenta usporenja k .

Ako posmatramo presipno mesto između dve trake, pri čemu je površina poprečnog preseka materijala na kraju prve trake, koja se kreće konstantnom brzinom v_n , ulaz u presipno mesto i iznosi $A_{ul}(t)$, a površina poprečnog preseka materijala na početku sledeće trake u nizu je izlaz iz presipnog mesta i iznosi $A_{iz}(t)$ i kreće se promenljivom brzinom $v_{ref}(t)$, zakon o održanju kapaciteta, dat jednačinom (3.29) može se predstaviti na sledeći način:

$$A_{ul}(t) \cdot v_n = A_{iz}(t) \cdot v_{ref}(t) \quad (4.8)$$

Na osnovu (4.8), izraza za teorijsku brzinu (4.1), kao i na osnovu izraza (4.3) za izračunavanje $v_{ref}(t)$ pri porastu količine materijala na traci, tj. pri važećim uslovima definisanim u (4.2), može se izvesti da ako je

$$\begin{aligned} v_{ref}(t) = v_t(t) \wedge v_{ref}(t) < v_n &\Rightarrow A_{iz}(t) = A_n, \\ v_{ref}(t) = v_n &\Rightarrow A_{iz}(t) = A_{ul}(t). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Iz ovoga se može zaključiti da će pri porastu materijala na traci prema primenjenom algoritmu, referentna brzina imati vrednost teorijske brzine, tj. da će pratiti porast materijala na traci u određenoj proporciji. Kao posledica toga, površina poprečnog preseka materijala na traci težiće svojoj nazivnoj vrednosti, odnosno traka će biti u potpunosti popunjena. U tom slučaju, srednja vrednost za snagu i srednja vrednost za brzinu imaće svoje minimalne vrednosti pri zadatim ograničenjima, odnosno ostvariće se najveće uštede energije. U slučaju kada bi se traka kretala konstantnom brzinom v_n , oblik materijala na izlazu bi pratio oblik materijala na ulazu.

U trenutku kada jedan od uslova definisanih u (4.2), ne bude više ispunjen, brzina izlazne trake, tj. $v_{ref}(t)$ će se menjati na osnovu izraza (4.5). Drugim rečima, kada $A_{ul}(t)$ počne da opada i $v_{ref}(t)$ će početi da opada. Ako i dalje težimo tome da izlazna traka bude maksimalno popunjena, ali da ne dođe do presipanja materijala preko ivica trake, odnosno da bude ispunjen uslov $A_{iz}(t) \leq A_n$, na osnovu izraza (4.8) i izraza za $v_{ref}(t)$, koja je definisan izrazom (4.5), sledi

$$\frac{A_{ul}(t) \cdot v_n}{v_{ref}(t_2) - k \cdot (t - t_2)} \leq A_n, \quad (4.10)$$

$$A_{ul}(t) \cdot v_n \leq \underbrace{A_n \cdot v_{ref}(t_2)}_{A_{ul}(t_2) \cdot v_n} - A_n \cdot k \cdot (t - t_2). \quad (4.11)$$

Na osnovu izraza (4.10) i (4.11), može se zaključiti da vrednost koeficijenta usporenja k mora da bude manja od brzine opadanja teorijske brzine, odnosno nejednakost (4.12) mora da bude zadovoljena, kako ne bi došlo do presipanja materijala.

$$\frac{v_n}{A_n} \frac{\Delta A_{ul}(t)}{\Delta t} \geq k \quad (4.12)$$

U izrazu (4.12) je $\Delta A_{ul}(t) = A_{ul}(t_2) - A_{ul}(t) > 0$ i $\Delta t = t - t_2 > 0$, u posmatranom slučaju kada površina poprečnog preseka materijala na traci opada, a $t > t_2$. (Napomena: izrazi od (4.8) do (4.12) izvedeni su u apsolutnom domenu).

Nagle i česte promene brzine svakako su štetne za opremu, pa treba odrediti odgovarajuću vrednost koeficijenta k , tako da bude zadovoljen uslov (4.10), iz dva razloga: da ne bi došlo do presipanja materijala i da ne bi došlo do uključenja sistema za električno kočenje. Takođe, prilikom određivanja vrednosti za koeficijent usporenja k , treba voditi računa i o tome da što se njegova vrednost više smanjuje, manja je mogućnost da će doći do električnog kočenja, ali takođe, odstupanje $A_{iz}(t)$ od A_n je sve veće, tj. popunjenost trake je sve manja, pa su i uštede energije manje.

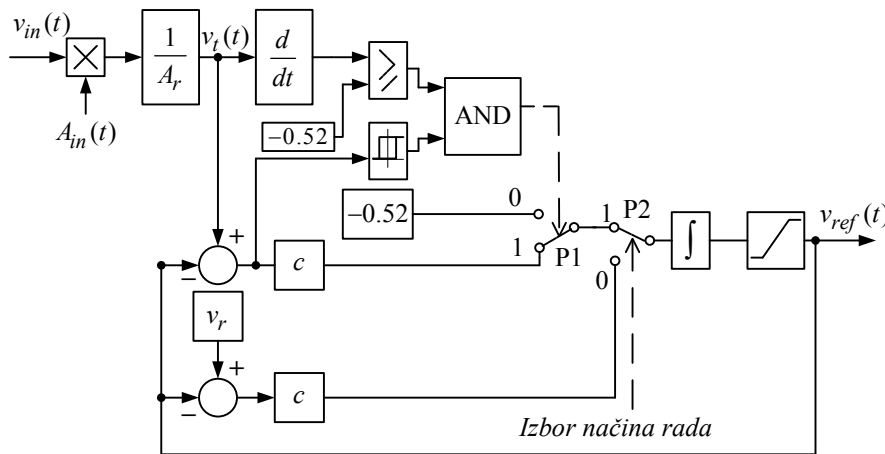
U prethodno opisanom slučaju, kada je referentna brzina tračnog transportera rezultat primene algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja $k = 0,1$ [% v_n /s], tračni transporter počinje da usporava uvek kada je uslov $dv_t(t)/dt < 0$ ispunjen, čime se sužava opseg rada tračnog transportera sa teorijskom brzinom $v_t(t)$. Cilj daljeg usavršavanja postojećeg algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja je da se proširi opseg rada sa teorijskom brzinom $v_t(t)$, tako da se izbegnu nagle promene brzine, posebno kod usporenja. Na bazi iskustava iz prakse, da bi se izbegla štetna naprezanja trake u slučaju dugačkih tračnih transportera, ubrzanje 1 km trake od nulte do nazivne brzine u proseku bi trebalo da traje 30s, odnosno 3,3 [% v_n /s]. Ova vrednost predstavlja odgovarajući izbor i za ubrzanje i za usporenje [62] Ovako izabrana vrednost za koeficijent usporenja je u skladu sa tehničkim karakteristikama sistema, a u slučaju konkretnog sistema njegova vrednost iznosi $k_{max\ tehničko} = 3,5$ [% v_n /s]. U slučaju transportera na kome je vršena verifikacija rezultata istraživanja, najbolji rezultati u pogledu uštede energije dobijeni su za konstantan koeficijent usporenja u iznosu od $k = 0,52$ [% v_n /s], pri modifikaciji algoritma na način prikazan na Sl. IV.6, što je u skladu sa maksimalnom vrednošću za tehnički koeficijent usporenja. Kao što se može videti sa

slike, modifikacija algoritma se sastoji u promeni uslova datih u (4.2), tako da će se izraz (4.3) primenjivati u slučaju da su zadovoljeni uslovi definisani u (4.13),

$$\frac{dv_t(t)}{dt} \geq -0,52 \quad \wedge \quad v_t(t) - v_{ref}(t) \geq \varepsilon, \quad (4.13)$$

a izraz (4.5), u slučaju da su zadovoljeni uslovi

$$\frac{dv_t(t)}{dt} < -0,52 \quad \vee \quad v_t(t) - v_{ref}(t) \leq -\varepsilon. \quad (4.14)$$



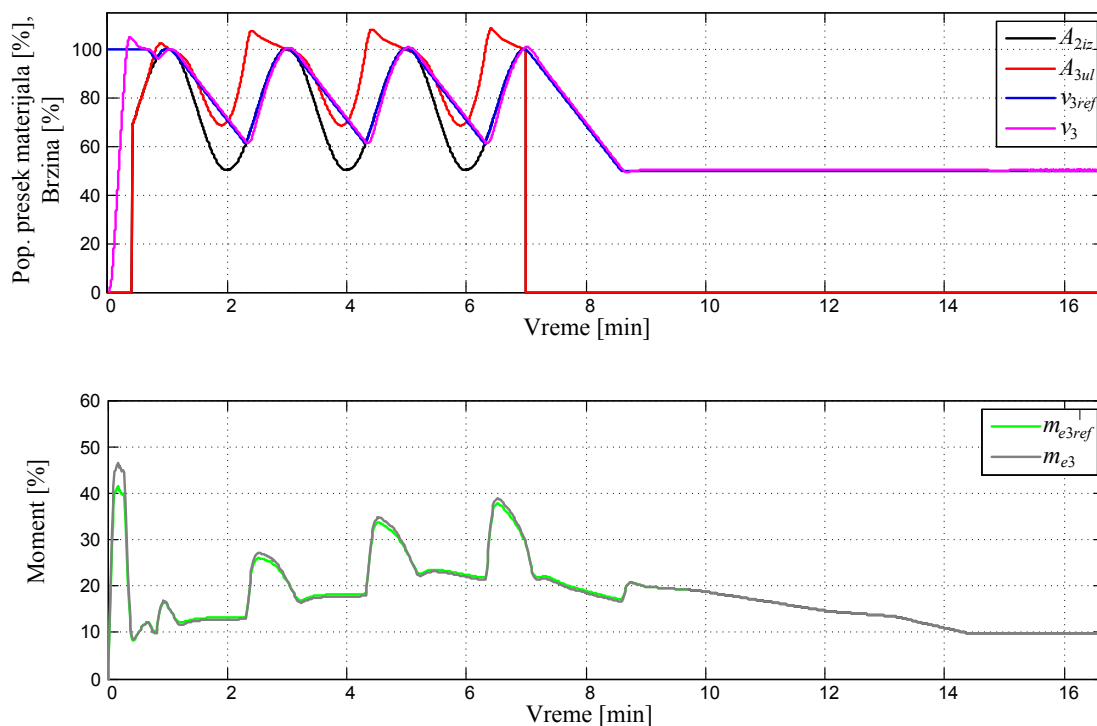
Sl. IV.6 Modifikovani algoritam za generisanje referentne brzine tračnog transportera

Analizirajući rad bagera na posmatranom V BTO sistemu površinskog kopa „Drmno”, primećeno je da oblik materijala koji se deponuje na traku ima jednu izraženu prostoperiodičnu komponentu sa periodom koja može biti nekoliko minuta, u zavisnosti od načina na koji bager kopa. Utvrđeno je da srednja vrednost periode ove komponente iznosi približno 4 minuta. Ova vremenska zavisnost trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala koji se deponuje na traku, može se izraziti na sledeći način:

$$A_{ul}(t) = A_{sr} \pm A_{sin} \cdot \sin\left(\left(2 \cdot \pi / T_{sin}\right) \cdot t\right). \quad (4.15)$$

Usvajanjem sledećih vrednosti za $A_{sin} = \pm 0,25$ [r.j.] i $A_{sr} = 0,75$ [r.j.] u izrazu (4.15), opseg promene ulaznog materijala se podešava između 0,5 i 1 [r.j.], u skladu sa opsegom promene brzine (između 50 i 100% nazivne brzine). Modifikovani algoritam za generisanje referentne brzine tračnog transportera prikazan na Sl. IV.6, primenjen je prema blok dijagramu datom na Sl. IV.3 u modelu trake za koju je izvršena verifikacija merenjem na terenu (III.2). Nova vrednost za konstantni koeficijent usporenja

$k = 0,52$ [% v_n /s] je određena u skladu sa (4.12), za vremensku zavisnost trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala koji se deponuje na traku $A_{ul}(t)$ definisanu izrazom (4.15), u slučaju da je $T_{sin} = 5$ min i predstavlja maksimalnu vrednost izvoda $\Delta A_{ul}(t)/\Delta t$. Simulacijom na datom modelu, sa dolazećim (ulaznim) materijalom čija je vremenska zavisnost data izrazom (4.15), za različite vrednosti periode sinusne komponente T_{sin} , dobijaju se rezultati prikazani na slikama Sl. IV.7, Sl. IV.8 i Sl. IV.9.

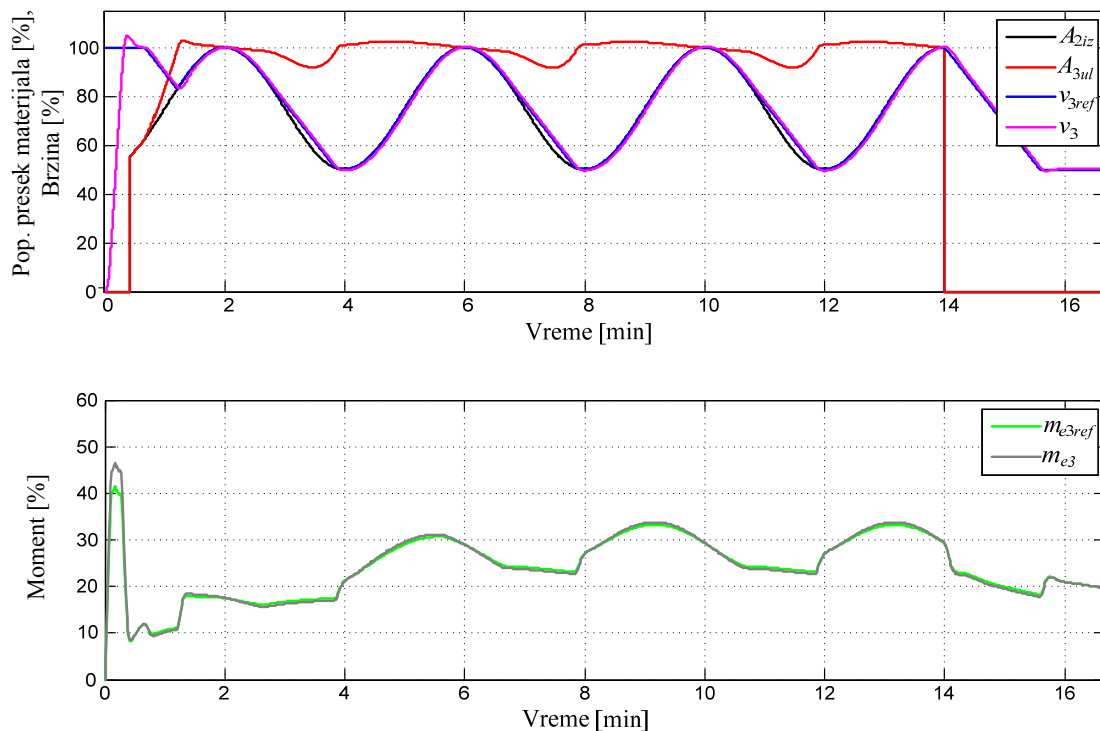


Sl. IV.7 $T_{sin} = 2$ min - Karakteristične veličine za posmatrani tračni transporter (prvi vezni tračni transporter u V BTO sistemu)

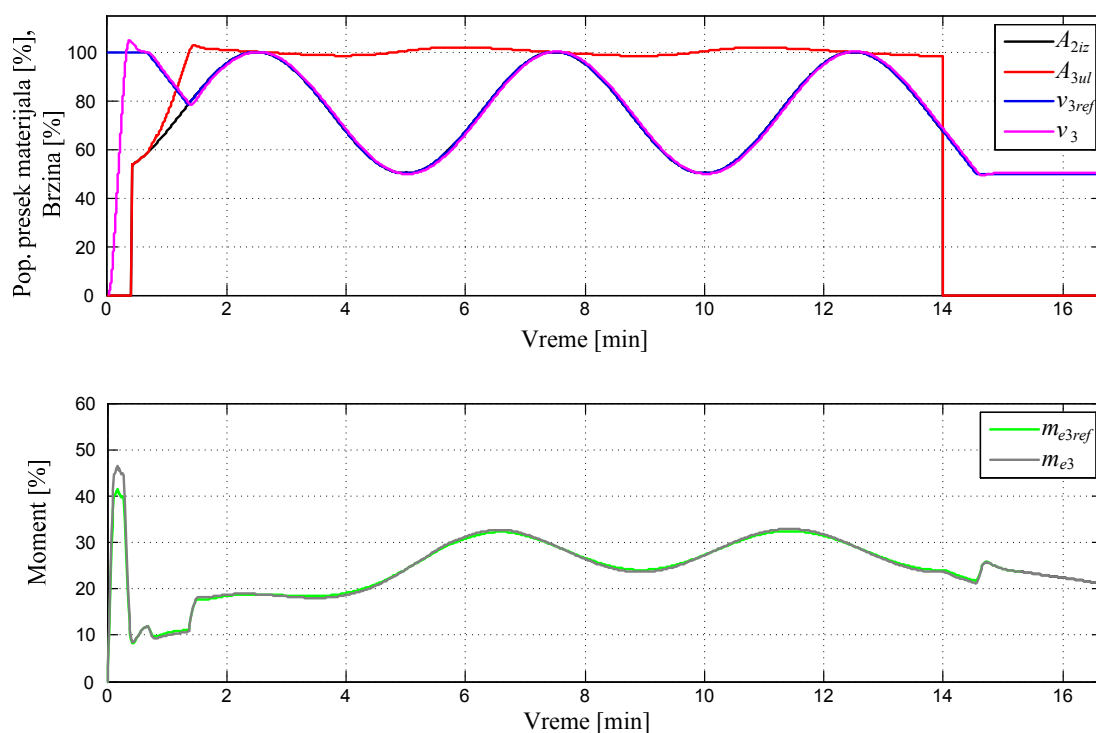
Mala povećanja trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na početku posmatranog tračnog transportera (A_{3ul}) preko nazivne vrednosti (100%) su posledica kašnjenja stvarne brzine tračnog transportera u odnosu na referentnu brzinu, koja prati oblik površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku pri njegovom porastu. Generisana referentna brzina predstavlja ulaz u „soft-start”, a izlaz iz „soft-start-a” predstavlja ulaz u PI regulator brzine, kao što je prikazano na blok dijagramu dinamičkog modela tračnog transportera na Sl. IV.3. Postojanje bloka za soft start dovodi do kašnjenja stvarne brzine u odnosu na referentnu brzinu, ali se na taj način izbegavaju nagle promene brzine koje dovode do dodatnih naprezanja u traci, posebno kod povećanja brzine. Kao što je objašnjeno u poglavlju II.3.6 i u literaturi [28], [61], konstrukcija transportera omogućava kratkotrajno povećanje površine

poprečnog preseka materijala na traci do 116%, čime se obezbeđuje da se transport materijala odvija bez presipanja materijala preko ivica trake, kao u gore pomenutoj situaciji.

Na osnovu prikazanih rezultata simulacija može se zaključiti da u slučajevima kada sinusna komponenta dolazećeg materijala ima periodu jednaku ili veću od 5 minuta, posmatrani tračni transporter će se kretati teorijskom brzinom $v_i(t)$, odnosno, neće se ulaziti u režim usporenja sa konstantnim koeficijentom usporenja od $k = 0,52$ [% v_n /s]. U slučajevima kada je perioda sinusne komponente $T_{sin} \leq 5$ min, postojaće periodi usporenja sa konstantnim koeficijentom usporenja $k = 0,52$ [% v_n /s], u skladu sa uslovima definisanim u (4.14). Takođe se može zaključiti iz prikazanih rezultata simulacija, da će u slučaju da dođe do iznenadnog prekida u deponovanju materijala na traku, nastati usporenje u kretanju trake sa usvojenim, odgovarajućim koeficijentom usporenja.



Sl. IV.8 $T_{sin} = 4$ min - Karakteristične veličine za posmatrani tračni transporter (prvi vezni tračni transporter u V BTO sistemu)



Sl. IV.9 $T_{sin} = 5$ min - Karakteristične veličine za posmatrani tračni transporter (prvi vezni tračni transporter u V BTO sistemu)

Dodatno, ako se posmatra slučaj kada perioda sinusne komponente dolazećeg materijala ima vrednost $T_{sin} = 4$ min, može da se sprovede uporedna analiza između dva slučaja: A) $k = 0,1$ [% v_n /s] i B) $k = 0,52$ [% v_n /s], u pogledu srednje mehaničke snage i utrošene električne snage po kubnom metru transportovanog materijala. Srednja mehanička snaga se u slučaju i -tog tračnog transportera (posmatra se prvi vezni, tj. treći tračni transporter u VBTO sistemu, $i = 3$) računa u ustaljenom stanju na osnovu izraza

$$P_{sr(i)} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \sum_{j=1}^{j=n} m_{m(i),j}(t) \cdot \omega_{m(i),j}(t), \quad (4.16)$$

gde je $m_{m(j)}$ - moment opterećenja j -tog motora (gde je $n = 3$), a $\omega_{m(j)}$ njegova brzina obrtanja, a t_1 - trenutak kada je nastupilo ustaljeno stanje. Izraz za srednju vrednost utrošene električne energije po kubnom metru transportovanog materijala (srednja vrednost specifične utrošene električne energije), takođe u ustaljenom stanju, računa se na osnovu izraza

$$W_{sr(i)} = \frac{1}{\eta_{FP} \cdot \eta_M} \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{sr(i)}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} A_{iz(i)}(t) \cdot v_{(i)}(t) dt}, \quad (4.17)$$

gde je $A_{iz(i)}$ - vrednost površine poprečnog preseka materijala u poslednjem registru poslednjeg segmenta na glavi tračnog transportera, odakle materijal pada na rep sledeće trake u nizu, η_{FP} stepen korisnog dejstva frekventnog pretvarača i η_M stepen korisnog dejstva motora.

Rezultati simulacija za srednju vrednost snage i srednju vrednost specifične utrošene električne energije za isti period rada za posmatrani tračni transporter (prvi vezni tračni transporter u V BTO sistemu) u ustaljenom stanju, dati su u tabeli Tab. IV-1.

Tab. IV-1 Rezultati simulacija u ustaljenom stanju rada posmatranog tračnog transportera (prvog veznog tračnog transportera u V BTO sistemu)

slučaj	P_{sr} [MW]	W_{sr} [kWh/m ³]
A	1,514	0,404
B	1,431	0,382

Rezultati prikazani u Tab. IV-1 pokazuju da se modifikovanim algoritmom sa konstantnim koeficijentom usporenja za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera mogu ostvariti dodatne uštede u iznosu od 5,5%. Ova poboljšanja su dobijena u skladu sa dva osnovna ograničenja sistema, da se izbegne presipanje materijala preko ivica trake i da se izbegnu nedozvoljeno nagle promene brzine.

Bez obzira na postignute rezultate, i dalje se ne može smatrati da je nova vrednost konstantnog koeficijenta usporenja optimalna, zato što je ona određena za pretpostavljene uslove transporta, pre svega za stalne otpore kretanja i za stalnu specifičnu težinu materijala koji se transportuje.

IV.1.2. Optimalna vrednost koeficijenta usporenja

Pri optimalnoj vrednosti koeficijenta usporenja po kriterijumu smanjenja potrošnje električne energije, moment pogonskih motora tračnog transportera treba da bude jednak nuli, kada ne postoji mogućnost rekuperacije energije. Kako uslovi pri usporavanju trake nisu uvek isti, zbog različite količine materijala na traci, promenljivih

otpora kretanja usled vremenskih uslova i stanja opreme, k bi trebalo da je promenljiva, a ne konstanta, kako bi vrednost momenta pogona uvek bila bliska nuli, ali nikad negativna. Ova vrednost bi se mogla odrediti na osnovu izraza (4.18), koji proističe iz Njutnovog zakona,

$$k_{oe}(t) = \frac{m_m(t)}{J_\Sigma(t)}, \quad (4.18)$$

gde je $J_\Sigma(t)$ ukupni moment inercije sveden na vratilo pogonskog motora, uključujući i efekat mase materijala koji se transportuje. U skladu sa standardom DIN 22101, trenutna vrednost momenta opterećenja se može izračunati iz izraza (4.19),

$$m_m(t) = m_{m0} + m_m(M_{bm}), \quad (4.19)$$

gde je m_{m0} konstantni deo momenta opterećenja, a $m_m(M_{bm})$ je deo momenta opterećenja koji je funkcija mase materijala na traci i zbog toga je vremenski promenljiva funkcija. Slično se može zaključiti i za ukupni moment inercije opterećenog tračnog transportera, koji je dat izrazom (4.20),

$$J_\Sigma(t) = J_{\Sigma 0} + J_\Sigma(M_{bm}) \quad (4.20)$$

u kome je $J_{\Sigma 0}$ konstantni deo ukupnog momenta inercije, a $J_\Sigma(M_{bm})$ je deo proporcionalan masi materijala koji se transportuje trakom i zbog toga takođe vremenski promenljiva funkcija.

Konstantan deo momenta opterećenja, kao i konstantan deo momenta inercije mogu se izračunati sa zadovoljavajućom tačnošću. Ove vrednosti se mogu s vremena na vreme aktuelizovati sa ciljem da se uvažavaju promene koje su u međuvremenu nastale u sistemu tračnih transportera, a kao posledica promene dužine trasa ili stanja opreme. Međutim, i dalje ostaju komponente momenta opterećenja i momenta inercije koje se ne mogu dovoljno precizno odrediti jer su funkcije mase materijala na traci i spoljnih uticaja, kao što je to objašnjeno u prethodnom poglavlju (IV.1). Ovo sve vodi ka nepreciznom izračunavanju $k_{oe}(t)$ i neodgovarajućem uspoređenju tračnog transportera.

Dakle, iz do sada izloženog, može se zaključiti da optimalna vrednost $k(t)$ mora da zadovolji:

- 1) kriterijum definisan sa (4.12), kojim se obezbeđuje maksimalna popunjenost trake bez presipanja materijala preko ivica trake,

- 2) tehnički kriterijum, $k(t) \leq k_{max\ tehničko} = 3,5$ [% v_n /s], kako bi mehanička naprezanja sklopova postrojenja pri takvom usporenju ostala u granicama dozvoljenih i
- 3) kriterijum smanjenja potrošnje električne energije definisan sa (4.18).

U uslovima kada je $k_{oe}(t) > k_{max\ tehničko}$, u periodima usporenja se ne sme primenjivati $k_{oe}(t)$, već pogonski motori moraju da razvijaju momente u skladu sa izrazom (4.21),

$$m_e \geq k_{max\ tehničko} \cdot J_{\Sigma}(t) - m_m(t). \quad (4.21)$$

Izraz (4.21) upućuje na zaključak da se u algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera mora uvesti i merena vrednost za moment motora, kako bi sistem radio sa optimalnom vrednošću $k(t)$ za aktuelne uslove rada. Olakšavajuću okolnost predstavlja činjenica da se ova vrednost stalno meri zbog potreba SCADA sistema, pa je kao takva uvek dostupna. Metodologija za razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera koju treba primeniti mora da obezbedi lako uvođenje ove veličine u algoritam. Takođe, kako se radi o nelinearnom sistemu kojim treba upravljati i način upravljanja mora biti nelinearan.

Jedan od mogućih načina za ostvarivanje odgovarajućeg nelinearnog načina upravljanja svakako predstavlja fazi logika, kao metodologija pogodna za razvoj algoritma za generisanje referentne brzine, zbog jednostavnosti primene, prilagodljivosti promenama u sistemu i robustnosti. Pored poznatih dobrih osobina fazi logike [63], u konkretnom slučaju njena primena omogućava uvođenje momenta motora kao druge ulazne veličine u algoritam, pored informacije o trenutnoj vrednosti površine poprečnog preseka materijala. Pravilnim podešenjem fazi skupova i definisanjem fazi pravila omogućava se generisanje referentne brzine kojom se obezbeđuje odgovarajuća popunjenost trake sa promenljivim koeficijentom usporenja, koji odgovara uslovima rada i zadovoljava sva tri pomenuta kriterijuma. U slučaju kada je to moguće, na ovaj način se obezbeđuje i kontroliše minimalna vrednost momenta motora pri kojoj se ima optimalna vrednost $k(t)$ po kriterijumu smanjenja potrošnje električne energije.

IV.2. Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera razvijen na bazi fazi logike

Klasična realizacija upravljanja se zasniva na matematičkom modelu objekta upravljanja, međutim upravljanje je moguće sprovesti i na drugi način. Ukoliko je matematički model upravljanja suviše složen ili je nepoznat, a objekat upravljanja ima definisano ponašanje, upravljanje se može vršiti na osnovu pravila po kojima se sistem ponaša. Ovakvi sistemi predstavljaju osnovu svakog sistema veštačke inteligencije [63].

Fazi logika predstavlja jednostavan način za obradu ovakvih pravila. Sredinom šezdesetih godina, profesor Lotfi Zadeh (Univerzitet Berkli, Kalifornija) je uvideo da tačno-netačna priroda Bulove logike, ne uključuje mnoge nijanse „sivog” koje su prisutne u stvarnom svetu [64]. Da bi uvažio prelaz između tačnog i netačnog, Zadeh je proširio ideju klasičnog skupa na, kako ga je nazvao, fazi skup. Za razliku od Bulove logike, fazi logika je višeznačna. Izjave da element pripada ili ne pripada nekom skupu, da je iskaz potpuno tačan ili netačan, fazi logika pretvara u stepene pripadnosti, odnosno, neki iskaz može biti delimično tačan i delimično netačan u isto vreme. Zahvaljujući takvom pristupu, rečima opisano ponašanje nekog sistema se može matematički oblikovati, a pravila po kojima se sistem ponaša se mogu izraziti pomoću brojeva, sa kojima mogu da rade i najjednostavniji mikrokontroleri. Dakle, za razliku od klasičnog pristupa projektovanju regulatora, gde je polazna tačka bila da se pronade matematički model objekta upravljanja, u fazi pristupu se naglasak stavlja na razumevanje ponašanja celog sistema i oblikovanje takvog saznanja u pravila. Ovakav pristup je veoma pogodan za nelinearne sisteme upravljanja, odnosno za sisteme čije je ponašanje definisano, a matematički model komplikovan, kao što je to slučaj sa matematičkim modelom utrošene električne energije pojedinačnih pogona tračnih transportera u sistemu.

Fazi sistemi su u velikoj meri postali zamena konvencionalnim tehnologijama u velikom broju naučnih aplikacija i inženjerskih sistema, naročito u oblasti upravljanja sistemima i prepoznavanju oblika [65], a takođe i u vrlo raznorodnim komercijalnim aplikacijama i industrijskim sistemima. Upravljanje na bazi fazi logike je do sada sa uspehom primenjeno u upravljanju električnim mašinama [66], [67], [68], [69], liftovima [70], kranovima [71], u upravljanju aktivnim sistemom vešanja automobila [72] i mnogim drugim inženjerskim aplikacijama. Ovde će biti predstavljen algoritam

upravljanja razvijen na bazi znanja o objektu upravljanja - sistemu tračnih transporterera. Cilj algoritma za regulaciju brzine sistema tračnih transporterera, koji je razvijen na bazi fazi logike je rešavanje problema maksimizacije, odnosno, upravljanje referentnom brzinom sistema tračnih transporterera tako da oni rade sa maksimalnom energetsom efikasnošću, a to praktično znači da se transport materijala odvija sa maksimalno popunjenim trakama optimalnom brzinom. Upravljački algoritam razvijen na bazi fazi logike na svom izlazu generiše optimalnu vrednost referentne brzine, regulišući ubrzanje i usporenje trake u skladu sa svim prethodno objašnjenim sistemskim ograničenjima.

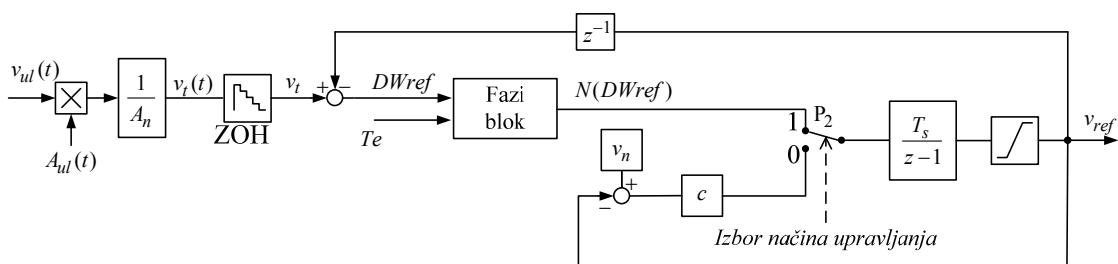
Kao što je prikazano u poglavlju III, struktura modela tračnog transporterera je poznata, ali se parametri modela menjaju usled promene različitih spoljnih uslova, a njihove se vrednosti ne mogu odrediti u svakom trenutku sa zadovoljavajućom tačnošću. Sva iskustva i saznanja o ponašanju pogona tračnog transporterera koja su bitna za posmatrani problem su ugrađena u upravljački algoritam pomoću lingvistički izraženih pravila. Fazi logika se koristi kao pogodan način da se postojeća baza znanja prevede u oblik koji je pogodan za implementaciju upravljačke strukture u PLC, u cilju pronalaženja optimalnog rešenja, a bez potrebe da se poznaju spoljni faktori koji mogu da utiču na usporenje pogona tračnog transporterera [73]. Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterera na bazi fazi logike je primenjen u cilju određivanja ubrzanja i usporenja pogona tračnog transporterera, pri čemu ovaj algoritam ima tri ulazne veličine, koje se inače mere zbog potreba funkcionisanja sistema i dostupne su u svakom trenutku, a to su: brzina prethodne trake u nizu, trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku i moment pogonskih motora. Blok dijagram algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterera koji je prikazan na Sl. IV.2 je modifikovan implementacijom fazi upravljačke strukture (fazi bloka) i prikazan na Sl. IV.10.

Kao što se može videti sa Sl. IV.10, fazi blok ima dva ulaza: DW_{ref} , koji se određuje na osnovu izraza (4.22),

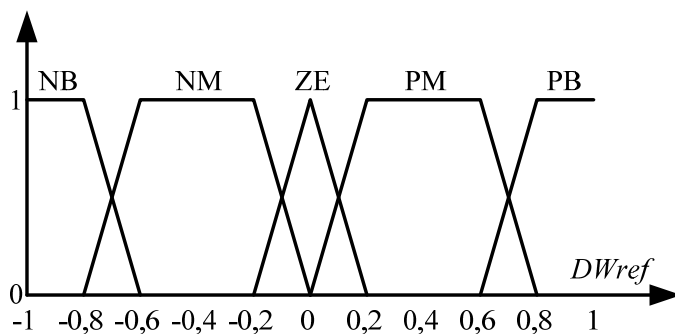
$$DW_{ref(n)} = v_{t(n)} - v_{ref(n-1)}, \quad (4.22)$$

i moment pogonskih motora T_e . Zadatak da se moment pogonskih motora održava na nuli u toku perioda usporenja, sada se izvršava u fazi bloku. Na taj način se ostvaruje usporenje pogona tračnog transporterera, a da su izbegnuti svi problemi koje izaziva

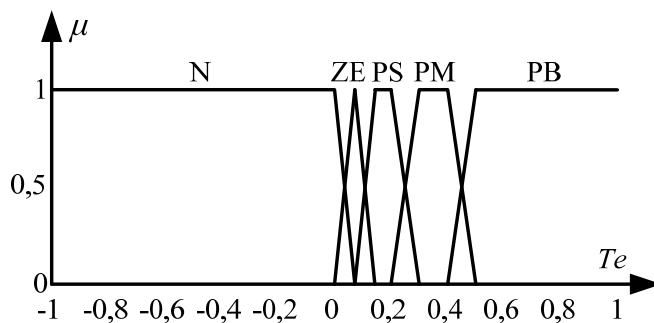
varijacija parametara sistema usled promene spoljnih faktora. Fazi blok ima jedan izlaz $N(DWref)$. Bazira se na metodama zaključivanja koje je u kontrolu sistema uveo Mamdani a razvijen je korišćenjem *Fuzzy Logic Toolbox* -a [74] i integrisan u MATLAB *Simulink* dinamički model tračnog transporterera, koji je predstavljen u poglavlju III. Funkcije pripadnosti za ulaznu promenljivu $DWref$ su prikazane na Sl. IV.11, funkcije pripadnosti za ulaznu promenljivu Te su prikazane na Sl. IV.12 i funkcije pripadnosti za izlaznu promenljivu $N(DWref)$ su prikazane na Sl. IV.13.



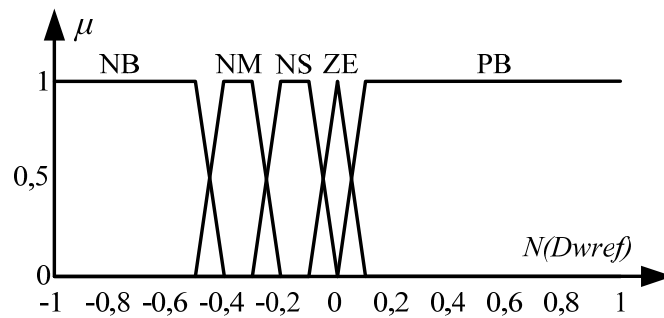
Sl. IV.10 Algoritam na bazi fazi logike za generisanje referentne brzine pojedinačnih tračnih transportera u sistemu tračnih transporterera



Sl. IV.11 Funkcije pripadnosti za ulaznu promenljivu $DWref$



Sl. IV.12 Funkcije pripadnosti za ulaznu promenljivu Te



Sl. IV.13 Funkcije pripadnosti za izlaznu promenljivu $N(DWref)$

Izlazna promenljiva $N(DWref)$ je priraštaj referentne brzine, koji se generiše na osnovu pravila definisanih u Tab. IV-2. Vrednosti za ulazne i izlaznu promenljivu su normalizovane sa baznim vrednostima, koje su određene u skladu sa nazivnim vrednostima za motor i tračni transporter, i koje su date u Prilogu III-1, na kraju poglavlja III.

Tab. IV-2 Fazi pravila

$DWref \backslash Te$	N	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	NS	NM	NB	NB
NM	ZE	ZE	NS	NM	NB
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	ZE	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PB	PB	PB	PB

U procesu fazifikacije, univerzalni skup kome pripadaju lingvističke promenljive $DWref$, Te i $N(DWref)$ je normalizovan u referentni interval $[-1, 1]$ i podeljen na fazi skupove: negativan (N), negativan veliki (NB), negativan srednji (NM), nula (ZE), pozitivan mali (PS), pozitivan srednji (PM), i pozitivan veliki (PB). MIN–MAX kompozicija se koristi za obradu fazi pravila, odnosno određivanje izlaza modela, dok se u procesu defazifikacije koristi metoda COG - centar gravitacije, tj. centroid.

Ako se pažljivo pogleda Tab. IV-2 mogu se jasno razdvojiti tri oblasti, koje se mogu predstaviti pomoću fazi pravila na sledeći način:

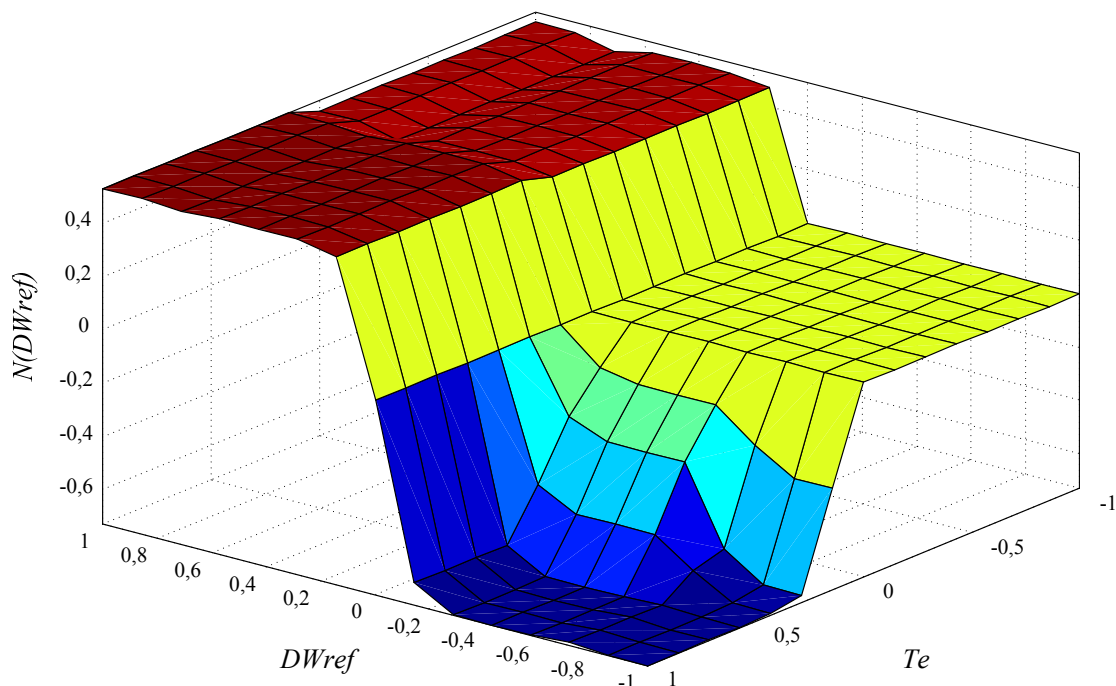
- Ako je Te N (negativan) onda je $N(DWref)$ ZE (nula) (siva oblast u Tab. IV-2) - ovo praktično znači da ako je vrednost momenta pogonskih motora bliska nuli, priraštaj referentne brzine mora da teži nuli sa ciljem da se izbegne aktiviranje električnog kočnja;
- Ako je $DWref$ ZE (nula) onda je $N(DWref)$ ZE (nula) (svetlo plava oblast u Tab. IV-2) - ovo praktično znači da ako se ima mala promena referentne brzine na ulazu (nula), da će i izlazna promenljiva, novi priraštaj referentne

brzine takođe težiti nuli, bez obzira na vrednost momenta pogonskih motora;

- *Ako je DW_{ref} PM onda je $N(DW_{ref})$ PB ili*
- *Ako je DW_{ref} PB onda je $N(DW_{ref})$ PB (roze oblast u Tab. IV-2) - što praktično znači da ako se trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku povećava, da pogon tračnog transportera mora da se ubrza sa odgovarajućim ubrzanjem, da bi se izbeglo presipanje materijala preko ivica trake.*

Željeni odziv sistema je ostvaren sa samo pet fazi skupova po promenljivoj, čime se značajno smanjuje veličina tabele pomoću koje su iskazana fazi pravila. Podela univerzalnog skupa na fazi skupove zavisi od potreba sistema (objekta upravljanja), a takođe njome mora da se obezbedi i odgovarajuća osetljivost izlazne promenljive na varijacije ulaznih promenljivih. Za ulaznu promenljivu Te dovoljan je samo jedan fazi skup „N”, kojim se definiše aktiviranje električnog kočenja, koje mora da se izbegne u procesu regulacije brzine. Kada je vrednost momenta pogonskih motora bliska nuli, potrebna je velika osetljivost funkcije upravljanja, zbog čega su granice odgovarajućih fazi skupova veoma strme. Za bilo koju pozitivnu vrednost promenljive Te , kada je ulazna promenljiva DW_{ref} pozitivna, algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike generiše veliku vrednost izlazne promenljive, u cilju izbegavanja presipanja materijala preko ivica trake. Za male promene ulazne promenljive DW_{ref} , odnosno kada trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku malo varira, izlazna promenljiva iz fazi regulatora ne treba da ima nagle promene, što se postiže adekvatnim podešavanjem „ZE” fazi skupova. Oblik generisane funkcije upravljanja predstavlja površinu koja je prikazana na Sl. IV.14.

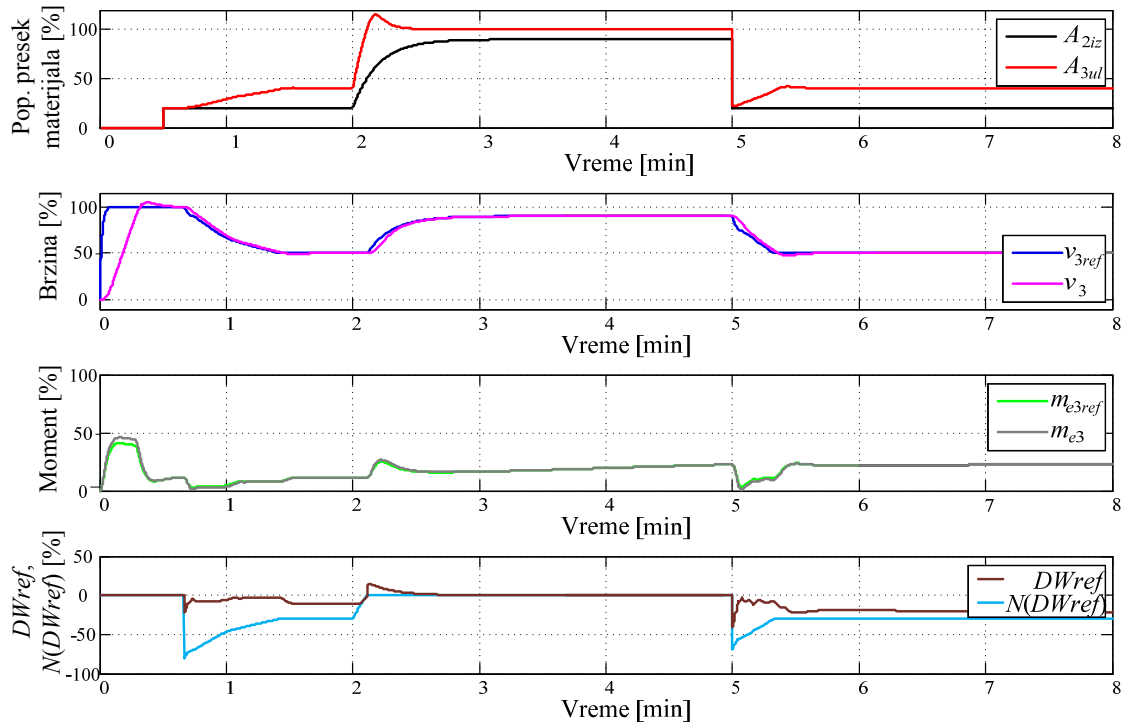
Opisani algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike je razvijen i testiran na detaljnom dinamičkom modelu tračnog transportera sa gumenom trakom koji je prikazan u poglavlju III. Algoritam je testiran za dva karakteristična slučaja, koja su izabrana da budu ista kao i u slučaju algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja (Sl. IV.4 i Sl. IV.5), jer najbolje ilustruju njegove performanse, a takođe omogućavaju i poređenje dobijenih rezultata. Rezultati simulacija su prikazani na Sl. IV.15 i Sl. IV.16.



Sl. IV.14 Oblik generisane površine upravljanja

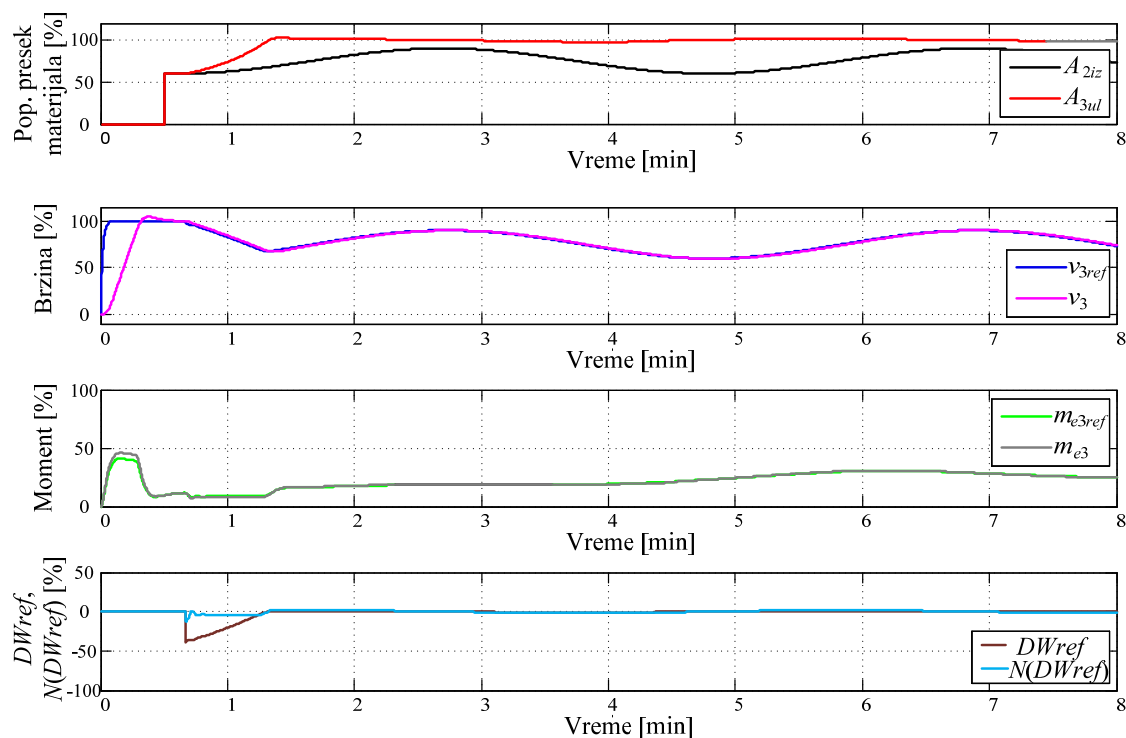
Prvi slučaj koji se razmatra je tračni transporter na posmatranom sistemu transportera. Traka se na početku zaleće iz stanja mirovanja do pune - nazivne brzine ($v_{3ref} = 100\%$). Površina poprečnog preseka materijala koji dolazi sa druge na treću traku ima vrednost nula, a zatim se u $t = 30s$ povećava na $A_{2iz} = 20\%$ (nazivne vrednosti). U trenutku $t = 40s$ uključuje se upravljanje brzinom (prekidač P2 u položaju „1”, Sl. IV.10). Povećanje površine poprečnog preseka dolazećeg materijala do vrednosti $A_{2iz} = 90\%$ počinje u $t = 2$ min, a u $t = 5$ min vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala se naglo smanjuje na vrednost $A_{2iz} = 20\%$. Rezultati simulacije opisanog procesa prikazani su na Sl. IV.15. Iz prikazanih rezultata simulacije može se zaključiti da se za porast trenutne vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na treću traku, razmatranim algoritmom za generisanje referentne brzine ostvaruje potrebno ubrzanje sa ciljem da se izbegne presipanje materijala preko ivica trake. Takođe se datim algoritmom u slučaju smanjenja trenutne vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na treću traku ostvaruje smanjenje referentne brzine, koje dovodi do smanjenja momenta pogonskih motora do nule. Treba naglasiti da ne dolazi do aktiviranja električnog kočenja, što je u skladu sa usvojenim kriterijumom o ostvarivanju uštede energije.

U drugom testu, trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku sadrži sinusnu komponentu $A_{2iz}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t)$. Prikazani rezultati simulacije na Sl. IV.16 pokazuju da popunjenost trake teži maksimalnoj, tj. nazivnoj vrednosti i da vrlo malo odstupa od nje.



Sl. IV.15 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri upravljanju referentnom brzinom primenom algoritma na bazi fazi logike: prelazni proces pri prelazu iz rada sa stalnom brzinom u rad sa promenljivom referentnom brzinom, pri promeni površine poprečnog preseka dolazećeg materijala od početne vrednosti jednake nuli na $A_{2iz} = 20\%$ (nazivne vrednosti), a zatim sa 20% na 90% nazivne vrednosti i obrnuto

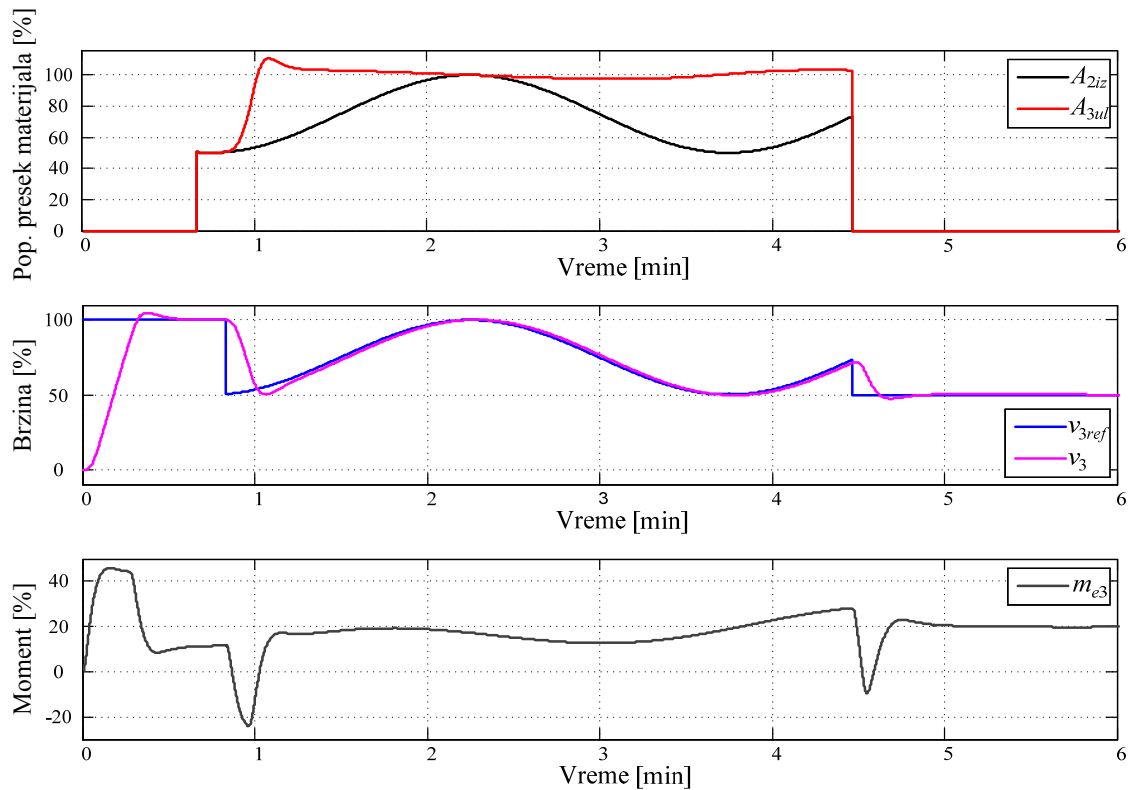
Poređenjem rezultata simulacija prikazanih na Sl. IV.15 i Sl. IV.16, sa rezultatima simulacija u slučaju primene algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja, Sl. IV.4 i Sl. IV.5, može se primetiti da je postignuta veća popunjenost treće trake u slučaju primene algoritma na bazi fazi logike, kao i optimalna vrednost koeficijenta usporenja $k(t)$ po kriterijumu smanjenja potrošnje električne energije, pri kojoj moment pogonskih motora tračnog transportera u određenim uslovima dostiže nultu vrednost.



Sl. IV.16 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri upravljanju referentnom brzinom primenom algoritma na bazi fazi logike: prelazni proces iz rada sa stalnom brzinom u rad sa upravljanjem referentnom brzinom pri sinusnoj promeni dolazećeg materijala

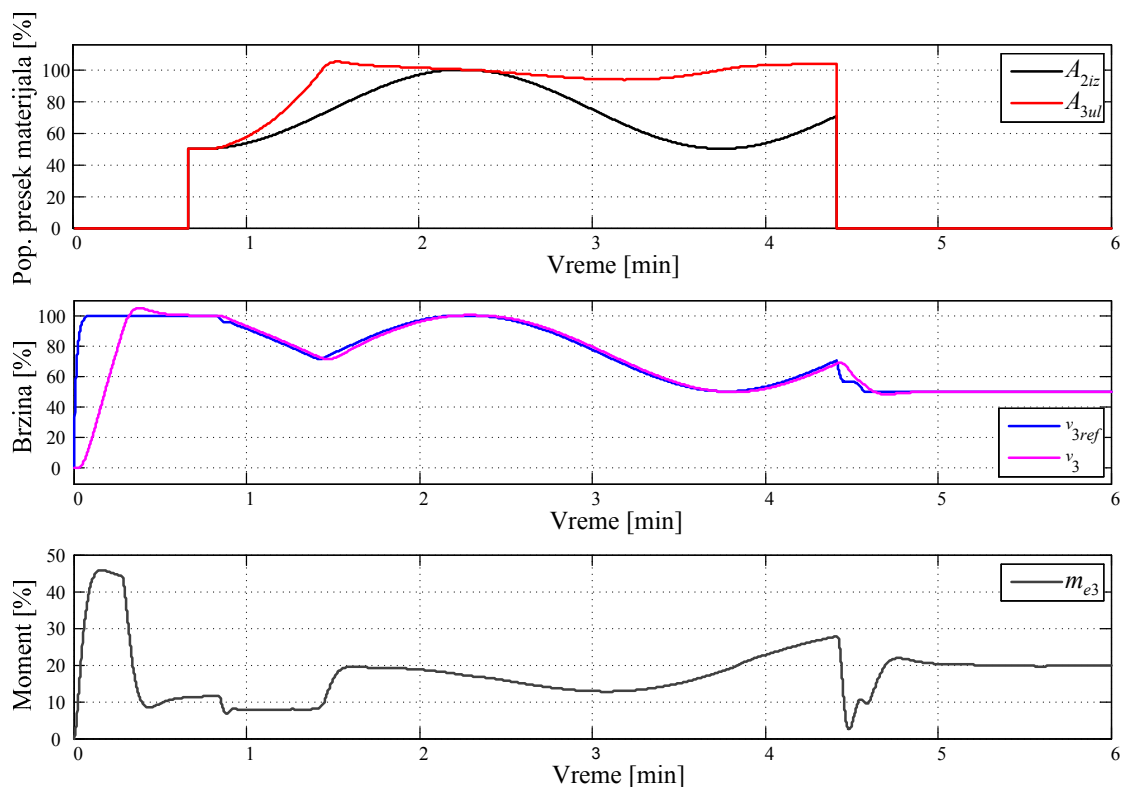
Prikaz uloge i verifikacija rada fazi logike, koja je primenjena u sistemu za generisanje referentne brzine, izvedena je pomoću dve simulacije, a dobijeni rezultati su prikazani na Sl. IV.17 i na Sl. IV.18. U obe simulacije se ista trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala deponuje na traku. Na Sl. IV.17 je prikazan slučaj kada je referentna brzina trake jednaka teorijskoj brzini $v(t)$, a na Sl. IV.18 je prikazan slučaj kada se referentna brzina trake dobija kao rezultat rada algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike. Iz prikazanih rezultata može se uočiti da će za posmatrani oblik površine poprečnog preseka materijala na traci, referentna brzina koja je rezultat algoritma na bazi fazi logike vrlo malo odstupati od teorijske brzine, što obezbeđuje optimalnu popunjenost trake po kriterijumu iskorišćenja njenog kapaciteta. Odstupanje od teorijske brzine u posmatranom slučaju nastaje u trenucima kada je potrebno da se smanji brzina zbog smanjenja površine poprečnog preseka dolazećeg materijala. Traka, koja se kreće teorijskom brzinom, usporava tako da se zahteva negativan moment pogona, odnosno dolazi do aktiviranja električnog kočenja (trenutak blizu prvog minuta i trenutak po isteku 4,5 minuta, Sl. IV.17). U istim

trenucima, u slučaju kada se koristi algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike (Sl. IV.18.), referentna brzina se smanjuje tako da se obezbeđuje minimalna vrednost momenta motora, koja je u posmatranim uslovima rada bliska nuli, ali pozitivna. Na ovaj način je ostvareno usporavanje sa optimalnom vrednošću koeficijenta usporenja $k(t)$ po kriterijumu smanjenja potrošnje električne energije.



Sl. IV.17 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri sinusnoj promeni dolazećeg materijala na traku kada je referentna brzina trake jednaka teorijskoj brzini $v(t)$

Na osnovu prikazanih rezultata se može zaključiti da se algoritmom za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike postiče transport materijala sa željenim ubrzanjem i usporanjem, bez presipanja materijala i rada u režimu električnog kočenja.



Sl. IV.18 Karakteristične vrednosti za tračni transporter pri sinusnoj promeni dolazećeg materijala na traku kada je referentna brzina trake rezultat algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike

IV.3. Komparativna analiza prikazanih algoritama sa stanovišta ostvarenih ušteda energije

Komparativna analiza prethodno prikazanih i opisanih algoritama za generisanje referentne vrednosti brzine transportera je sprovedena na osnovu rezultata simulacija, a u cilju određivanja stepena ostvarivanja energetske efikasnosti. Izvršeno je upoređenje sledeća tri načina rada transportera:

- A) transport materijala konstantnom brzinom,
- B) transport materijala primenom algoritma za generisanje referentne brzine tračnog transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja $k = 0,1[\% v_n/s]$, i
- C) transport materijala primenom algoritma za generisanje referentne brzine tračnog transportera na bazi fazi logike.

Simulacije su vršene na modelu tračnog transportera, koji je detaljno obrađen u poglavlju III.2. Vremenska zavisnost trenutne vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku ima sinusnu komponentu, i može se predstaviti sledećom analitičkom relacijom $A_{ul}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t)$, $T_{sin} = 4$ min, $A_{sin} = \pm 0,1$ [r.j.], a

A_{sr} varira u koracima od 0,1 [r.j.], u opsegu od 0,5 [r.j.] do 0,9 [r.j.]. Rezultati za srednju snagu i srednju vrednost specifične utrošene električne energije za posmatrane slučajeve A), B) i C), dobijeni su na osnovu izraza (4.16) i (4.17), a prikazani su u Tab. IV-3. Izračunavanje ovih srednjih vrednosti je vršeno za isti period vremena. Vremenski period u kome su vršeni proračuni prikazanih veličina, predstavlja celi umnožak periode T_{sin} . Kako su analize vršene za ustaljeni režim rada, dužina vremenskog intervala u kome je vršen proračun, nema uticaja na rezultate sprovedenih analiza. Za slučajeve B i C u tablici su date ostvarene razlike u odnosu na slučaj A. Ostvarene razlike su date u procentima, zato dobijene brojne vrednosti u slučajevima B i C za ΔP_{sr} i ΔW_{sr} imaju iste numeričke vrednosti

Iz Tab. IV-3 se jasno može uočiti da transport materijala promenljivom brzinom ima apsolutnu prednost u odnosu na transport materijala konstantnom brzinom. Smanjenje srednje snage varira u opsegu od (2,25 -21,1) % za slučaj B. Implementacijom algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike, slučaj C, numerička vrednost za $(\Delta P_{srC} - \Delta P_{srB})$, kao i za $(\Delta W_{srC} - \Delta W_{srB})$, varira u opsegu od (0,3 - 1,3) %.

Tab. IV-3 : Prikaz rezultata za srednju snagu i srednju vrednost specifične utrošene električne energije kada je $T_{sin} = 4$ min, za posmatrane slučajeve
A) pri radu sa konstantnom brzinom, B) pri radu sa algoritmom sa konstantnim koeficijentom usporenja i C) pri radu sa algoritmom na bazi fazi logike

A_{sr} [r.j.]		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
A	P_{srA} [MW]	1,176	1,305	1,434	1,564	1,693
	W_{srA} [kWh/m ³]	0,470	0,435	0,410	0,391	0,376
B	$\Delta P_{srB} = (P_{srA} - P_{srB})[\%]$	21,1	15,3	10,2	5,9	2,25
	$\Delta W_{srB} = (W_{srA} - W_{srB})[\%]$					
C	$\Delta P_{srC} = (P_{srA} - P_{srC})[\%]$	21,4	16,6	11,3	6,9	3,2
	$\Delta W_{srC} = (W_{srA} - W_{srC})[\%]$					
C-B	$(\Delta P_{srC} - \Delta P_{srB})[\%]$	0,3	1,3	1,1	1	1,05
	$(\Delta W_{srC} - \Delta W_{srB})[\%]$					

Ovo malo poboljšanje dobijeno u slučaju sa primenjenom fazi logikom u odnosu na slučaj sa konstantnim koeficijentom usporenja k , za datu vremensku zavisnost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na posmatranu traku, posledica je izbora odgovarajuće konstantne vrednosti za k , za postojeći skup

parametara sistema. Bolji rezultati se postižu u slučaju da se trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na posmatranu traku menja sa većom učestanošću, tj. kada T_{sin} ima manju vrednost. Rezultati simulacija za slučaj kada dolazeći materijal ima iste vrednosti za A_{sr} [r.j.], kao što je prikazano u prvoj vrsti u Tab. IV-3, ali je perioda sinusne komponente duplo manja, $T_{sin} = 2$ min, prikazani u Tab. IV-4, pokazuju da se numerička vrednost za $(\Delta P_{srB} - \Delta P_{srC})$ i za $(\Delta W_{srB} - \Delta W_{srC})$ u procentima približno udvostručuje.

Tab. IV-4: Prikaz rezultata za srednju snagu i srednju vrednost specifične utrošene električne energije kada je $T_{sin} = 2$ min, za posmatrane slučajeve
A) pri radu sa konstantnom brzinom, B) pri radu sa algoritmom sa konstantnim koeficijentom usporenja i C) pri radu sa algoritmom na bazi fazi logike

A_{sr} [r.j.]		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
A	P_{srA} [MW]	1,1757	1,305	1,434	1,563	1,693
	W_{srA} [kWh/m ³]	0,470	0,435	0,409	0,391	0,376
B	$\Delta P_{srB} = (P_{srA} - P_{srB})$ [%]	20,1	14,1	9,1	4,9	1,3
	$\Delta W_{srB} = (W_{srA} - W_{srB})$ [%]					
C	$\Delta P_{srC} = (P_{srA} - P_{srC})$ [%]	21,3	16,4	11,2	6,8	3,1
	$\Delta W_{srC} = (W_{srA} - W_{srC})$ [%]					
C-B	$(\Delta P_{srC} - \Delta P_{srB})$ [%]	1,2	2,3	2,1	1,9	1,8

Takođe, ako se uslovi rada promene u smislu da se ukupni otpori kretanja povećaju, kao posledica povećanja koeficijenta trenja, ili povećanja specifične mase materijala, bolji rezultati će se dobiti u slučaju algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike (slučaj C), koji ima veću fleksibilnost da prilagodi performanse sistema trenutnim promenama. Ako se posmatra drugi primer, u kome se vrednost koeficijenta trenja udvostručuje, specifična masa materijala (γ) se povećava za 20%, a veličine A_{sr} , T_{sin} i A_{sin} imaju vrednosti $A_{sr} = 0,75$ [r.j.], $T_{sin} = 4$ min i $A_{sin} = \pm 0,25$ [r.j.], dobijaju se novi rezultati koji su prikazani u Tab. IV-5.

Rezultati prikazani u Tab. IV-5 potvrđuju prednost primene algoritma za generisanje referentne brzine tračnog transportera na bazi fazi logike u odnosu na algoritam sa konstantnim koeficijentom usporenja. Kao posledica ove tvrdnje, postižu se dodatne uštede u iznosu od 6,3%. U slučaju da bager deponuje materijal na traku na drugačiji način od razmatranog, posebno u slučaju da trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na traci varira sa većom učestanošću i da postoje česti

prekidi u deponovanju materijala na traku, bolji rezultati će se ostvariti primenom algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike.

Tab. IV-5 Prikaz rezultata za srednju snagu i srednju vrednost specifične utrošene električne energije kada je $T_{sin} = 4$ min i uslovi rada promenjeni, za posmatrane slučajeve A) pri radu sa konstantnom brzinom, B) pri radu sa algoritmom sa konstantnim koeficijentom usporenja i C) pri radu sa algoritmom na bazi fazi logike

	A_{sr} [r.j.]	0,75
A	P_{srA} [MW]	3,574
	W_{srA} [kWh/m ³]	0,955
B	$\Delta P_{srB} = (P_{srA} - P_{srB})[\%]$	3
	$\Delta W_{srB} = (W_{srA} - W_{srB})[\%]$	
C	$(\Delta P_{srB} - \Delta P_{srC})[\%]$	6,3
	$(\Delta W_{srB} - \Delta W_{srC})[\%]$	

Bolji rezultati će se dobiti i u slučaju da se ukupni otpori kretanja povećaju, kao što je prikazano u Tab. IV-5. Kada se otpori kretanja smanje, to može da dovede do aktiviranja kočenja tračnog transportera u slučaju da se primenjuje algoritam sa konstantnim koeficijentom usporenja. Rezultat primene algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike je dobijanje optimalnog ubrzanja i usporenja u skladu sa postojećim sistemskim ograničenjima, bez obzira na spoljne uticaje. U zavisnosti od spoljnih uticaja postignute uštede utrošene energije će varirati, ali poboljšanje koje je ostvareno u odnosu na algoritam sa konstantnim koeficijentom usporenja je uvek prisutno.

V. Primena analiziranih algoritama za generisanje referentne brzine na realnom sistemu tračnih transportera

Sa stanovišta elektromotornih pogona postoje dva osnovna nivoa na kojima se mogu ostvariti poboljšanja energetske efikasnosti tračnih transportera: prvi se odnosi na efikasnost izabranih komponenti pogona, a drugi na primenjene načine upravljanja. U posmatranom sistemu su ostvarena poboljšanja na oba nivoa. Sa ciljem da se argumentuje poboljšanje energetske efikasnosti izborom odgovarajućih komponenti pogona tračnog transportera, u poglavlju V.1 će biti dat detaljan opis primenjene opreme. U poglavlju V.2 će biti prikazano upravljanje pogonima pojedinačnih tračnih transportera. U istom poglavlju će biti prikazana implementacija algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera u cilju povećanja njegove energetske efikasnosti, a u poglavlju V.3 će biti dat kraći opis kontrolnog centra, bez koga ne bi bila moguća realizacija algoritma koji je predmet analize i razvoja u ovoj doktorskoj disertaciji. I na kraju, u poglavlju V.4, biće prikazani rezultati merenja na opisanom postrojenju za slučaj implementacije algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja i algoritma na bazi fazi logike. Primenom još jedne dodatne metode, analize koja se bazira na sekvencijalnom kvadratnom programiranju za nalaženje minimuma nelinearne kriterijumske funkcije više promenljivih pod definisanim ograničenjima, ponovo će biti potvrđena prednost strukture bazirane na fazi logici u odnosu na strukturu sa konstantnim koeficijentom usporenja, što je već ustanovljeno simulacijama na modelu i prikazano u poglavlju IV.3.

V.1. Primenjeni pogon na tračnim transporterima V BTO sistema

Analize i istraživanja u oblasti pogona tračnih transportera pokazali su da postoji više razloga da se za pogon trake koriste pogoni kod kojih se može kontrolisati brzina. Pregled prednosti koje se ostvaruju primenom pogona sa promenljivom brzinom dat je u uvodnom poglavlju I.2, a zatim su ove prednosti detaljno obrađene u poglavlju II.3.3.

V.1.1. Pogon tračnog transportera sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača

Postrojenja koja su pomenuta u prethodnom delu, odnosno postrojenja kod kojih se koriste tračni transporteri zahtevaju veliku pouzdanost, mogućnost servisa, jednostavnu brzu zamenu neispravne opreme, što je jedino moguće sa standardnim serijskim proizvodima. Dobre osobine pogona sa regulisanom brzinom, kod kojih su primenjeni asinhroni motori, pre svega jednostavnost i robusnost sa jedne strane, i raspoloživost na tržištu kvalitetnih frekventnih pretvarača sa druge strane, jeste razlog zašto su u pogonskim stanicama tračnih transportera na V BTO sistemu korišćeni pogoni sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača.

V.1.1.1 Asinhroni motori

Proizvođači motora u svojim proizvodnim programima imaju motore za pogone sa regulisanom brzinom i sa frekventnim pretvaračima. Ovi motori se odlikuju povećanim nivoom izolacije namotaja, i posebno konstruisanim sistemom za hlađenje, naročito ako se koristi širok opseg promene brzine. Pojačanje izolacije je neophodno zbog povećanja maksimalne vrednosti napona na motoru u pojedinim režimima rada, naročito kod električnog kočenja, kao i zbog velike vrednosti du/dt usled komutacije u pretvaračima. Takođe, bar jedan od ležajeva mora biti galvanski izolovan od statora motora, kako bi se sprečilo uspostavljanje struja kroz ležajeve (*bearing currents*). Ove struje u dužem vremenskom periodu eksploatacije motora mogu da dovedu do oštećenja ležajeva, jer izazivaju eroziju kliznih površina. Renomirani proizvođači ležajeva već standardno proizvode ležajeve sa galvanskom izolacijom tako da se ovaj problem jednostavno prevazilazi.

Motori koji se koriste na površinskim kopovima ili u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom moraju da budu adekvatne konstruktivne zaštite, od prašine i vode. Motori u podzemnim rudnicima su izrađeni u Ex zaštiti.

Zbog značaja ovih motora u procesu rada oni su snabdeveni termo-sondama za merenje temperature ležajeva i namotaja statora. Na motorima se predviđaju i mesta za ugradnju senzora za vibro-dijagnostiku. Navedeni senzori se mogu povezati na upravljački sistem frekventnog pretvarača, na centralni upravljački sistem postrojenja u čijem sastavu je pogon (pogonska stanica tračnog transportera, bager,). Savremeni

frekventni pretvarači raspolažu mogućnošću bez-senzorskog merenja brzine sa visokom tačnošću, dovoljnom za potrebe upravljanja pogonom tračnog transportera.

V.1.1.2 Frekventni pretvarači

Sa ciljem da se ilustruju prednosti primene frekventnog pretvarača u elektromotornim pogonima, u daljem tekstu je dat kratak opis njegove konstrukcije.

Energetski deo uređaja čine ispravljač, jednosmerno međukolo i invertor. Ispravljači u pretvaračima mogu biti neupravljivi ili upravljivi. Neupravljivi ispravljači ili diodni ispravljači su jednostavni i pouzdani, i kod njih su naizmenični napon napajanja i prvi harmonik struje praktično u fazi. Ovo značajno doprinosi da je ukupan faktor snage pretvarača blizak jedinici pri opterećenjima pogona koja su bliska nazivnom, bolji nego kod asinhronih motora koji se direktno napajaju iz mreže. Upravljivi ispravljači su tiristorski ili u novije vreme tranzistorski. Upravljivi ispravljači omogućavaju rekuperaciju energije, tj. prenos energije u oba smera, od mreže prema pogonu i od pogona nazad u mrežu. Ovo je od posebnog značaja u pogonima gde postoji značajna količina potencijalne ili kinetičke energije koja se pod određenim uslovima oslobađa, i njenim vraćanjem u mrežu se mogu ostvariti uštede energije. Tiristorski ispravljači su i danas raspoloživi na tržištu, mogu biti za veće snage i više napone u odnosu na tranzistorske. Međutim, tiristorski ispravljači imaju nepovoljnije karakteristike u pogledu odnosa prema mreži, loš faktor snage, i prisutnost viših harmonika. Tranzistorski, ili aktivni ispravljači (*active front end* - AFE) koji rade na principu impulsno širinske modulacije (PWM), omogućavaju dvosmerni prenos energije, sa jediničnim faktorom snage i vrlo niskim sadržajem viših harmonika u struji mreže. Takođe, aktivni ispravljači omogućavaju održanje stalnog napona u jednosmernom kolu sve do 65% napona mreže, i mogu se koristiti kao aktivni kompenzatori reaktivne snage na sabirnicama sa kojih se napajaju. Treba imati u vidu da se danas na tržištu najčešće nude aktivni ispravljači za niske napone, do 690 V, dok samo nekoliko najvećih proizvođača raspolaže rešenjima za napone od 6kV, koja su dosta komplikovana, glomazna i ne tako kvalitetna kao što je slučaj sa uređajima na niskom naponu. Međutim, treba očekivati u doglednoj budućnosti kvalitetna rešenja sa tranzistorima snage za napon od 6kV. U pogledu cene najpovoljniji su diodni ispravljači, zatim tiristorski i na kraju tranzistorski, aktivni ispravljači.

Osnovna uloga jednosmernog međukola je filtriranje jednosmernog napona na ulazu u inverter. Ovo kolo, kod naponskih invertora obavezno sadrži kondenzator, koji pored filtriranja, obezbeđuje reaktivnu energiju za rad motora. Prigušnice za smanjenje sadržaja viših harmonika koji potiču od komutacije invertorskih tranzistora mogu se nalaziti u jednosmernom međukolu, ili ispred ispravljača. Kada su prigušnice ispred ispravljača, tada smanjuju i izobličenje struje koje potiče od rada ispravljača. Mesto povezivanja prigušnica zavisi od koncepta koji je usvojio proizvođač. Prilikom izbora frekventnog pretvarača treba uzeti u obzir potrebne vrednosti induktivnosti i način njihovog povezivanja, kao i karakteristike mreže na koju se pretvarači priključuju. Kod pogona gde postoji potreba za primenom električnog kočenja, u jednosmerno kolo se opciono ugrađuje sistem za kočenje, koji čini modul za kočenje i otpornik za disipaciju energije kočenja. Opisani sistem za kočenje nije potreban ako se koristi neki od pomenutih upravljivih ispravljača.

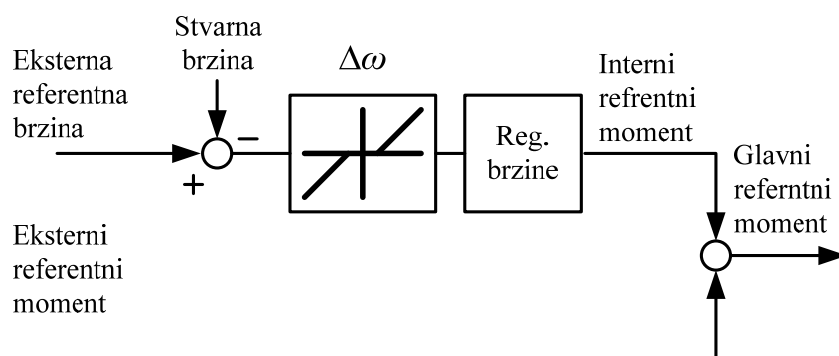
Inverter čini šest grupa punoupravljivih poluprovodničkih prekidača (tranzistora snage) u trofaznoj mostnoj sprezi. Kod pretvarača današnjih generacija prekidači rade u režimu impulsno širinske modulacije (PWM), na visokim prekidačkim učestanostima, od nekoliko kHz. Zahvaljujući tome, struja motora ima praktično sinusan talasni oblik. Ova poslednja činjenica, predstavlja značajnu dobit pogona sa frekventnim pretvaračima, jer u motoru ne nastaju praktično nikakvi dodatni gubici, u odnosu na rad pri napajanju iz mreže.

Impulsno širinska modulacija (PWM) se realizuje korišćenjem modulacionih tehnika na bazi nekih od algoritama za upravljanje motorom, kao što su vektorska kontrola (FOC) ili direktna kontrola momenta (DTC). Konstrukcija energetskog dela frekventnog pretvarača obezbeđuje visoku energetska efikasnost, tako da mu je stepen iskorišćenja između 0,95 i 0,99.

Upravljački sistem savremenih frekventnih pretvarača je moćan upravljačko regulacioni sistem. Moguće je realizovati različite načine upravljanja i regulacije, pre svega po momentu ili po brzini. Procesor omogućava i komunikaciju pretvarača sa postrojenjem, između pojedinih pogona, ako ih ima više, i sa nadređenim nivoom upravljanja. U frekventnom pretvaraču standardno su integrisani sistemi za merenje napona jednosmernog kola i struje motora. Na osnovu ovih izmerenih veličina sračunavaju se vrednosti napona mreže i motora. Takođe, na osnovu dinamičkog

modela motora koji je integrisan u procesoru može se izračunati i momenat motora, obično u procentima od nazivne vrednosti momenta motora. Dinamički model omogućava i izračunavanje stvarne brzine na osnovu merenih veličina. Frekventni pretvarač omogućava akviziciju njegove interne temperature, kao i temperature motora pomoću termo sonde. Ukoliko se ne koriste termo sonde moguće je imati informaciju o temperaturi motora na osnovi struje motora (opterećenja), a uz pomoć termičkog modela koji je integrisan u procesoru. Procesorski sistem ima integrisan jedan ili više PID regulatora, kojima se mogu regulisati vrednosti praktično bilo koje od merenih ili estimiranih veličina, momenta, brzine, procesnih veličina, itd. Izbor uloge regulatora se određuje softverski, na osnovu raspoloživih opcija. Parametriranje regulatora se može vršiti jednostavnim zadavanjem odabranih vrednosti. Savremene generacije pretvarača raspoložuju integrisanim algoritmima za samostalno parametriranje regulatora.

Za frekventne pretvarače koji se koriste za pogon tračnog transportera, posebno je bitno da imaju PID regulator brzine sa prozorom (*Window*), i dodatni ulaz za eksterni referentni moment. Na Sl. V.1 prikazan je principijelni blok dijagram regulacionog dela takvog frekventnog pretvarača. U slučaju višemotornih pogona na tračnom transporteru, iz nadređenog sistema upravljanja svim frekventnim pretvaračima prosleđuju se iste vrednosti za *Eksternu referentnu brzinu* i *Eksterni referentni moment*. Podešavanjem parametara u „prozor” bloku ($\Delta\omega$) dozvoljava se da se pogoni kreću različitim brzinama za $\pm\Delta\omega$, a da se pri tome ne uključuje regulator brzine (interni referentni moment je jednak nuli). Tada svi pogoni daju isti moment, koji odgovara vrednosti na ulazu za eksterni referentni moment. Na ovaj način se ostvaruje ravnomerna raspodela opterećenja za sve pogone i ako se ne obrću istim brzinama, na primer zbog različitih prečnika pogonskih bubnjeva usled istrošenosti gumene obloge, ili nalepljenog blata.



Sl. V.1 Blok dijagram regulacionog dela u regulatoru brzine frekventnog pretvarača sa prozorom i dodatnim ulazom za eksterni referentni moment

U cilju efikasnijeg uključivanja frekventnog pretvarača u celokupni sistem pogona, jednostavnog nadzora, podešavanja i upravljanja, frekventni pretvarači su opremljeni različitim mogućnostima za povezivanje sa okruženjem.

- Lokalna komunikacija služi za podešavanje, upravljanje i nadzor nad radom frekventnog pretvarača, odnosno pogona u celini, sa lica mesta, odnosno na samom pretvaraču. Ovu komandnu jedinicu čini displej sa tastaturom.
- Frekventni pretvarači renomiranih proizvođača imaju više digitalnih ulaza i izlaza, na radnom naponu od 24 VDC, što omogućava razmenu logičkih komandi sa okruženjem.
- Relejni ulazi i izlazi omogućavaju razmenu logičkih komandi na drugim naponskim nivoima, različitim od 24 VDC.
- Analogni ulazi i izlazi koji su uobičajeno integrisani u frekventni pretvarač omogućavaju upravljanje i zatvaranje povratnih veza u cilju integrisanja pretvarača u sistem upravljanja. Analogni ulazi i izlazi mogu biti naponski (0 - 10 VDC), strujni (0 - 20 mA), ili impulsni.
- Savremeni frekventni pretvarači raspoložu i mogućnošću povezivanja sa drugim jedinicama u sistemu, i nadređenim nivoima upravljanja, SCADA, itd., preko različitih standardnih komunikacionih protokola, RS232 i RS485, ProfiBus, Interbus, DeviceNet, Modbus, Ethernet, itd.

Komunikacione opcije frekventnog pretvarača pružaju velike mogućnosti u pogledu komandovanja i nadzora nad samim frekventnim pretvaračem, odnosno pogonom, kako sa lica mesta, ili iz neposrednog okruženja, tako i daljinski. Posebno treba istaći mogućnost sprezanja više pretvarača kod višemotornih pogona u jedinstveni sistem, koji obezbeđuje raspodelu opterećenja u srazmeri sa mogućnostima i potrebama pojedinih pogona.

Pored već pomenutih funkcija, procesorski sistem frekventnog pretvarača obezbeđuje i integraciju niza zaštitnih funkcija, tako da pretvarač postaje visoko autoprotektivan, sa brojnim zaštitama vrlo visoke efikasnosti. Pored sopstvene zaštite pretvarač obezbeđuje i kompletnu zaštitu motora koji se iz njega napaja. Kao što su:

- zaštita od pregrevanja, i pretvarača i motora,
- trenutno delujuću prekostrujna zaštita,

- zaštita od zemljospoja,
- podnaponska i prenaponska zaštita,
- nesimetrija faza.

U zavisnosti od vrste zaštite kontrolni sistem reaguje upozorenjem ili isključenjem pogona, jednostavnim blokiranjem tranzistora u invertoru. Sva upozorenja i reagovanja zaštita procesor memoriše, tako da se naknadno može videti kada se i koja greška dogodila.

Na osnovu izloženog, očigledno je da pretvarač ima integrisan zaštitni sistem vrlo visokih performansi, tako da pri ugradnji pretvarača ne treba koristiti ni jednu od standardnih motornih zaštita, niti automatski prekidač, dovoljni su samo brzi topljivi osigurači između mreže i ispravljača. Na ovaj način štede se značajna investiciona sredstva, prostor u razvodu, i smanjuje se broj elemenata u postrojenju, a time se ukupna pouzdanost povećava.

Kod tračnog transportera se koriste dve konfiguracije frekventnih pretvarača: za pojedinačni i za višemotorni pogon (*single* i *multi drives*).

Frekventni pretvarači za pojedinačni pogon se standardno proizvode sa diodnim ispravljačem i tranzistorskim invertorom. Kod kraćih tračnih transportera, sa usponom, kod kojih se ne koristi regulisanje brzina u radu, ne ugrađuje se sistem za otporničko kočenje, čoper i otpornik za kočenje. Ako je potrebno kočenje pomoću motora, zbog skraćanja vremena zaustavljanja, i/ili regulacije brzine, u jednosmerno kolo se dodaje otpornik za kočenje. Otporničko kočenje je tehno-ekonomski opravdano ako snaga kočenja nije veća od 20% snage pogona, i ako se kočenje retko koristi. Ukoliko je potrebna veća snaga kočenja postoje dve mogućnosti, da se paralelno sa diodnim ispravljačem poveže aktivni ispravljač (AFE), ili da se umesto diodnog ispravljača koristi aktivni ispravljač (AFE).

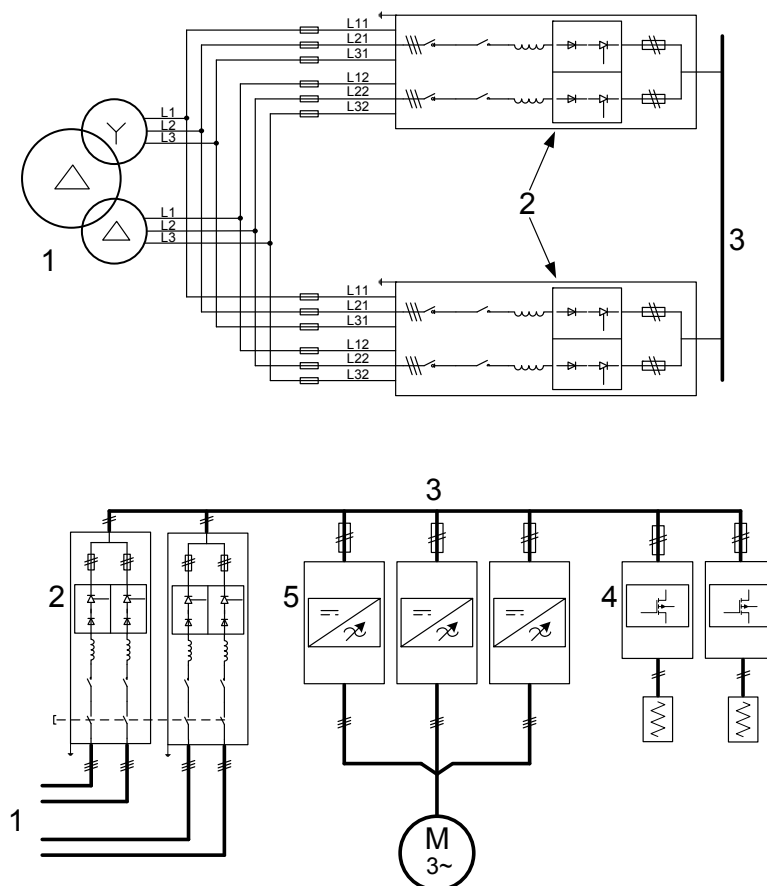
Frekventni pretvarači za pojedinačni pogon se mogu koristiti i kod višemotornih pogona, ali se tada koordinacija funkcionisanja pogona ostvaruje preko nadređenog sistema upravljanja.

Frekventni pretvarači za višemotorni pogon se konfigurisu od posebnih modula, ispravljačkih i invertorskih. Na Sl. V.2 je prikazana konfiguracija frekventnog pretvarača za pojedinačni pogon koja je primenjena u četvoromotornom pogonu na

V BTO sistemu. Ukupna instalisana snaga ispravljača je jednaka ukupnoj instalisanoj snazi invertora.

Korišćenjem dva ispravljačka modula smanjuju se izobličenja struje u dovodnom vodu, ali to zahteva primenu tronamotajnog transformatora, sa spregom sekundarnih namotaja kojom se ostvaruje fazni pomeraj sekundarnih napona za 30° . Korišćenje tronamotajnog transformatora povećava cenu elektromotornog pogona.

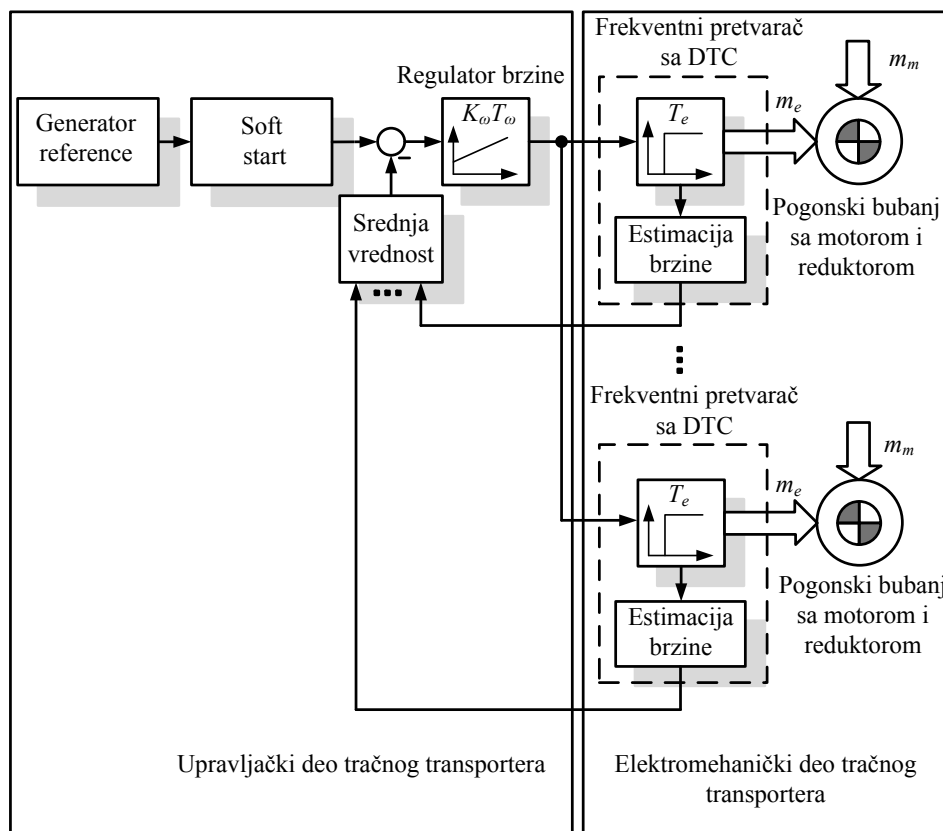
Podela ispravljača na dva ispravljačka modula ima prednost u tome što se mogu koristiti unificirane jedinice manje snage, čime se smanjuje potreban broj rezervnih delova. U slučaju otkaza jednog od ispravljačkih modula, može se nastaviti rad samo sa jednom jedinicom, ali sa ograničenim kapacitetom, odnosno ograničenom snagom pogona. Kao i ispravljači, invertori se mogu konfigurisati iz više paralelno vezanih modula manje snage, čime se ostvaruju prednosti u pogledu jednostavne zamene, količine rezervnih delova i pouzdanosti u radu.



Sl. V.2 Konfiguracija frekventnog pretvarača za pojedinačni pogon u četvoromotornom pogonu tračnog transportera na V BTO sistemu:
 1 - tronamotajni transformator; 2 - ispravljački moduli; 3 - jednosmerno međukolo;
 4 - čoperski moduli sa otpornicima za kočenje; 5 - invertorski moduli

V.2. Upravljanje pogonom pojedinačnih tračnih transporterata i sistemom u celini

Opisani način generisanja referentne brzine u režimu rada sa promenljivom brzinom (poglavlje IV) može se primeniti i kod tračnih transporterata sa jednim pogonom sa asinhronim motorom koji se napaja iz frekventnog pretvarača, i kod tračnih transporterata većeg kapaciteta koji imaju više pogonskih motora. Kod višemotornih pogona tračnog transporterata, pored promenljive brzine frekventni pretvarači moraju da obezbede i ravnomernu raspodelu opterećenja svih pogona. Transportni sistemi kod kojih se koriste tračni transporterati sa više motora su složeni, i zahtevaju odgovarajući sistem upravljanja. Da bi se svi navedeni zahtevi ostvarili za upravljanje transporterima koriste se programabilni logički kontroleri (*Programmable Logic Controllers - PLC*). Kontroleri koji se koriste u ovakvim slučajevima moraju da izvrše deo upravljačkih funkcija sa svim pogonima, sa pogonom trake, pogonom zateznog bubnja, pogonom odbojne ploče i drugim pomoćnim pogonima. Na Sl. V.3 prikazan je principijelni blok dijagram upravljanja sa pogonom trake sa više od dva motora.



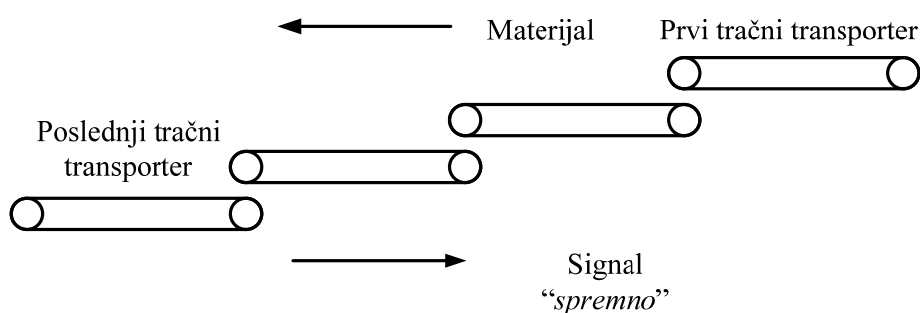
Sl. V.3 Blok dijagram strukture upravljanja višemotornim pogonom trake tračnog transporterata

Funkcija regulatora brzine trake implementirana je u PLC-u, gde se generiše i referentna brzina po ranije opisanom algoritmu (poglavlje II.3.4). Regulator brzine može da bude PI ili PID. Ne preporučuje se jak uticaj diferencijalnog dejstva zbog elastičnosti traka. Sve pomenute funkcije u PLC-u moraju biti realizovane sa stalnim brzinom uzorkovanja (periodom odabiranja). Dovoljno je da perioda odabiranja bude 50ms, što zadovoljava potrebe regulacije, sa obzirom na dinamiku promene brzine. Izlazni signal regulatora brzine se kao referentni moment prosleđuje svim frekventnim pretvaračima. Na datom primeru je frekventni pretvarač koji koristi DTC algoritam upravljanja. Informacije o brzinama pojedinih pogona su estimirane vrednosti koje se dobiju iz frekventnih pretvarača. Tačnost ove informacije je sasvim dovoljna za ovakvu vrstu pogona. Procesor koju se koristi za upravljanje frekventnim pretvaračem je mnogo brži nego procesor u PLC-u, zbog potrebe upravljanja brzo promenljivim veličinama, strujom i momentom. Komunikacija između PLC - a i frekventnih pretvarača mora da bude ostvarena odgovarajućim brzim protokolom, jer oni stalno razmenjuju veći broj informacija preko kontrolnih reči (Control Words) i statusnih reči (Status Words). Danas su za ovu namenu pogodni sledeći standardni protokoli ModBus+, ProfiBus, Ethernet, DeviceNet. Brzina komunikacije ne sme da je manja od 12MBit/s.

Raspodela opterećenja između pogona se može ostvariti korišćenjem opcije *Master-Slave*, kao što je objašnjeno u poglavlju II.3.4, kojom raspolažu skoro svi frekventni pretvarači serijske proizvodnje. U tom slučaju jedan od pogona je glavni (*master*) i njegov interni regulator brzine reguliše brzinu trake, ostali pogoni dobijaju referentni momenat od njega. Tračni transporteri sa više pogona mogu, a i moraju da rade i kada svi pogoni nisu aktivni, ako to uslovi rada dozvoljavaju, npr. kod smanjenja opterećenja usled smanjenog kapaciteta, ili skraćanja dužine tračnog transportera, što je čest slučaj na površinskim kopovima. *Master-Slave* rešenje nije pogodno u tom slučaju, jer tada treba menjati uloge pojedinim frekventnim pretvaračima, što nije jednostavno, i zahteva zaustavljanje rada postrojenja.

Efekti primene tračnog transportera sa upravljanjem brzinom kretanja trake u funkciji kapaciteta u potpunosti dolaze do izražaja kada se koriste u okviru sistema sa više tračnih transportera u nizu. U II.2 su opisani takvi sistemi, i navedena su tipična mesta primene.

Da bi se omogućio ispravan rad jednog sistema tračnih transporterera mora da postoji odgovarajuća komunikacija između njih. Nezavisno od toga da li se koriste tračni transporteri sa stalnom ili promenljivom brzinom neophodno je da postoji prosleđivanje informacije o ispravnosti (spremnosti za rad) tračnog transporterera u suprotnom smeru od smera kretanja materijala. Ako redosled tračnih transporterera u sistemu definišemo tako da je prvi u nizu tračni transporter na koji se utovaruje materijal Sl. V.4, da bi se sistem pokrenuo prvo mora da se pokrene poslednji tračni transporter u nizu, zatim pretposlednji i tako do prvog u nizu. Ova informacija se naziva „dozvola za rad”, i prosleđuje u navedenom smeru pod uslovom da su sve funkcije i uslovi na tračnom transporteru u stanju „spremno“ („*ready*”), i da je postignuta neka unapred definisana brzina (obično između 30 i 60% v_n). U slučaju kvara na nekom od tračnih transporterera, ili aktiviranja SVE STOP funkcije, zaustavljaju se svi tračni transporteri koji se nalaze ispred onog tračnog transporterera na kome se dogodio kvar gledano u smeru kretanja materijala. Ovo zaustavljanje se vrši jednostavnim isključenjem pogona. Tračni transporter se zaustavlja slobodnim usporavanjem po inerciji, a mehaničke kočnice se aktiviraju pri malim brzinama. U slučajevim gde bezbednost ljudi i opreme to zahteva, može se aktivirati mehaničko kočenje odmah pri davanju komande za zaustavljanje. Po propisima o bezbednosti rada opisani uslov se prenosi kroz sistem tračnih transporterera jednostavnim žičanim vezama.



Sl. V.4 Redosled tračnih transporterera u sistemu

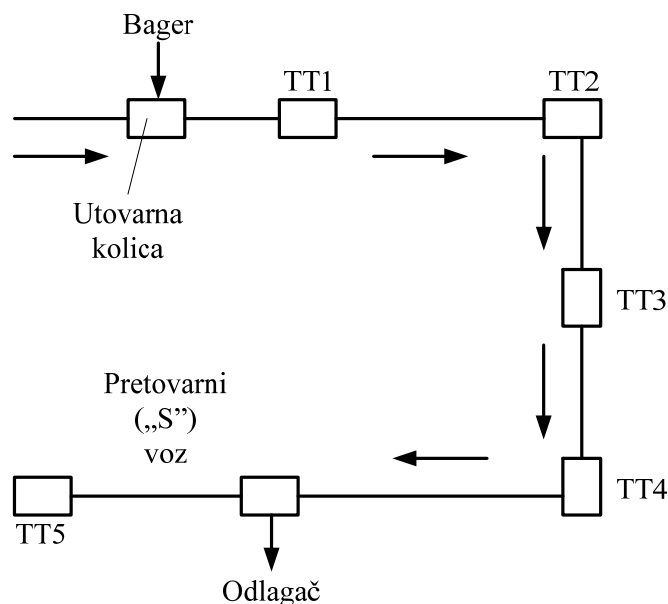
Kod sistema tračnih transporterera gde se koriste pogoni sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača uslov „dozvola za rad” se takođe prenosi žičanom vezom. Kod ovih pogona, moguće je obezbediti dva načina zaustavljanja.

Prvi način, definisan po IEC standardu kao kategorija 0, je slobodno usporavanje isključenjem motora - tada se frekventni pretvarači dovode u režim „*coast*”, tj. tranzistori u invertoru se blokiraju. Prelaze u neprovodno stanje. Drugi način,

definisano po IEC standardu kao kategorija 1, je zaustavljanje sa zadatim koeficijentom usporenja, korišćenjem mogućnosti električnog kočenja pomoću frekventnih pretvarača.

Zaustavljanje na prvi način se koristi u slučaju aktiviranja komande za hitno zaustavljanje (SVE STOP) na tračnom transporteru na kome je komanda aktivirana, jer se polazi od pretpostavke da je tračni transporter u neregularnom stanju. Na isti način se mogu zaustaviti i ostali tračni transporteri ispred ovoga, ali oni se mogu zaustaviti i sa nekim zadatim koeficijentom usporenja (kategorija 1). U ovom drugom slučaju, vreme zaustavljanja kod ostalih tračnih transportera mora biti kraće od zaustavljanja slobodnim usporenjem, da ne bi došlo do nagomilavanja materijala na tračnom transporteru na kome je aktivirana komanda za zaustavljanje. Zaustavljanje u kategoriji 1 se može primeniti kod svakog regularnog zaustavljanja tračnog transportera u funkciji procesa, sa usporenjem koje će obezbediti zaustavljanja sa vremenom kraćim ili dužim od vremena kod slobodnog zaustavljanja u zavisnosti od potrebe.

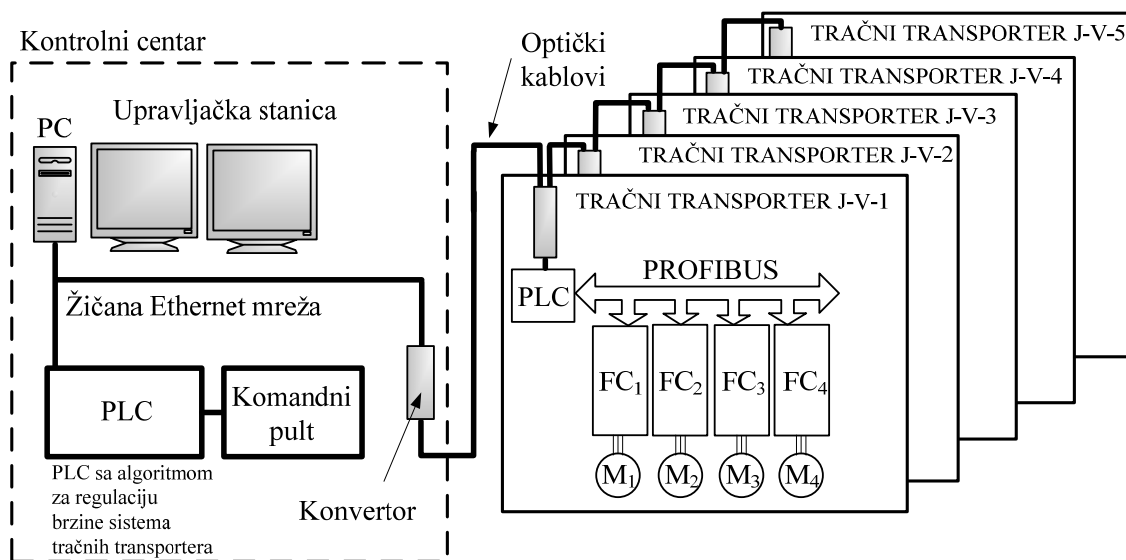
Na Sl. V.5 prikazana je uprošćena šema jednog sistema tračnih transportera sa pet pogonskih stanica, bagerom i odlagačem. Bager u radu može da deponuje materijal na prvi TT 1 ili na drugi TT 2 tračni transporter. Materijal se prenosi sa TT 3 i TT 4 do TT 5, sa koga se materijal prebacuje na odlagač.



Sl. V.5 Sistem tračnih transportera sa pet pogonskih stanica

Kod sistema tračnih transportera kao što je prikazan na Sl. V.5, ako se primenjuje regulacija brzine traka, postoji potreba za razmenom većeg broja informacija

između pojedinih transporterera. U ovakvim slučajevim neophodno je da se koristi objedinjeno, centralno upravljanje celim sistemom, iz jednog kontrolnog centra. Za razmenu informacija između transporterera i kontrolnog centra moraju da se koriste brzi protokoli i odgovarajući način prenosa podataka. Zbog dužina trasa koriste se optički kablovi ili bežična komunikacija, ako uslovi i konfiguracija terena to dozvoljavaju. Uprošćena konfiguracija mreže prikazanog sistema tračnih transporterera sa Sl. V.5 je prikazana na Sl. V.6. Nadređeni sistem upravljanja je lociran u kontrolnom centru (CC), gde je smešten PLC koji objedinjuje upravljanje sistemom, PC sa monitorima na kojima je implementirana SCADA, monitor koji prati rad sistema putem mrežnih (IP) video kamera postavljenih na svakom transporteru i ostala potrebna oprema. PLC i PC su Ethernet mrežom povezani sa PLC-ovima na pogonskim stanicama tračnih transporterera. U datom primeru, na svakoj stanici tračnog transporterera se nalaze po četiri frekventna pretvarača koja su sa lokalnim PLC-om povezani ProfiBus mrežom. Na svakoj pogonskoj stanici tračnog transporterera, u PLC-u je implementiran regulator srednje brzine za upravljanje brzinom trake koji je opisan u poglavlju II.3.4 i prikazan na Sl. II.25 i Sl. V.3, a u PLC-u u kontrolnom centru je implementiran algoritam za izračunavanje referentnih brzina tračnih transporterera u funkciji trenutnog kapaciteta, koji je opisan u poglavlju IV.



Sl. V.6 Komunikaciona mreža sistema tračnih transporterera

Algoritam za upravljanje brzinom u zavisnosti od kapaciteta zahteva informaciju o količini materijala koja se deponuje na traku tračnog transporterera čija se

brzina podešava. U primeru datom na Sl. V.5 najpogodnije je da se ovaj uređaj postavi na glavu tračnog transportera TT2. Na tom mestu mora da prođe sav materijal nezavisno od mesta na kome se trenutno nalazi bager. Informacija koja se dobija sa ovog mesta može da omogući podešavanje brzine TT3 na način kako je to opisano u IV.1. Ukoliko se želi upravljanje brzinom preostalih tračnih transportera, TT4 i TT5 potrebno je raspolagati informacijom o trenutnoj količini materijala koja se deponuje na njih. Ova informacija bi se mogla dobiti postavljanjem dodatnih uređaja za merenje na glave TT3 i TT4, međutim ovo je neekonomično rešenje sa obzirom na cenu uređaja za merenje trenutnog kapaciteta. Potrebna informacija o trenutnom kapacitetu se može dobiti primenom odgovarajućeg algoritma. Ovaj algoritam podrazumeva određivanje raspodele materijala duž traka i opisan je u slučaju formiranja dinamičkog modela trake u poglavlju III.1. Ovde će biti objašnjena implementacija datog algoritma na realnom sistemu, sa ciljem da se prikaže implementacija algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera u PLC-u kontrolnog centra. Postupak se vrši uzimanjem odbiraka informacije o površini poprečnog preseka materijala koji se deponuje na početak trake, sa vremenom odabiranja koje odgovara dužine trake ΔL .

Površina poprečnog preseka materijala koji se deponuje (A_i) izračunava se pomoću relacije:

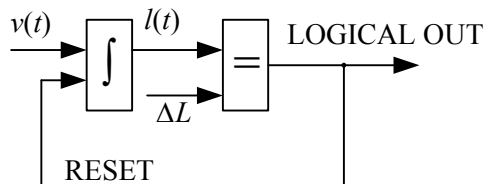
$$A_{rep\ i} = \frac{v_i}{v_{i-1}} A_{glava\ (i-1)}, \quad (5.1)$$

gde je i redni broj tračnog transportera za koji se vrši uzorkovanje, v brzina trake, A_{glava} površina poprečnog preseka materijala na glavi tračnog transportera, a A_{rep} površina poprečnog preseka na repu trake prethodnog tračnog transportera.

Na ovaj način mogu se akumulirati podaci o površini poprečnog preseka materijala na svakih ΔL trake na koju se deponuje materijal. Pošto je brzina trake promenljiva i vreme odabiranja je promenljivo. Na Sl. V.7 prikazan je princip određivanja trenutka odabiranja. Brzina trake se integriše pomoću resetabilnog integratora. Kada izlaz integratora postane jednak sa ΔL generiše se logička komanda za vršenje odabiranja, i istovremeno se resetuje integrator. Vrednost odbirka se smešta u prvi registar bloka „memorijski niz”. Ovaj blok predstavlja određeni prostor rezervisan u memoriji PLC-a. Broj registara u bloku „memorijski niz”, je:

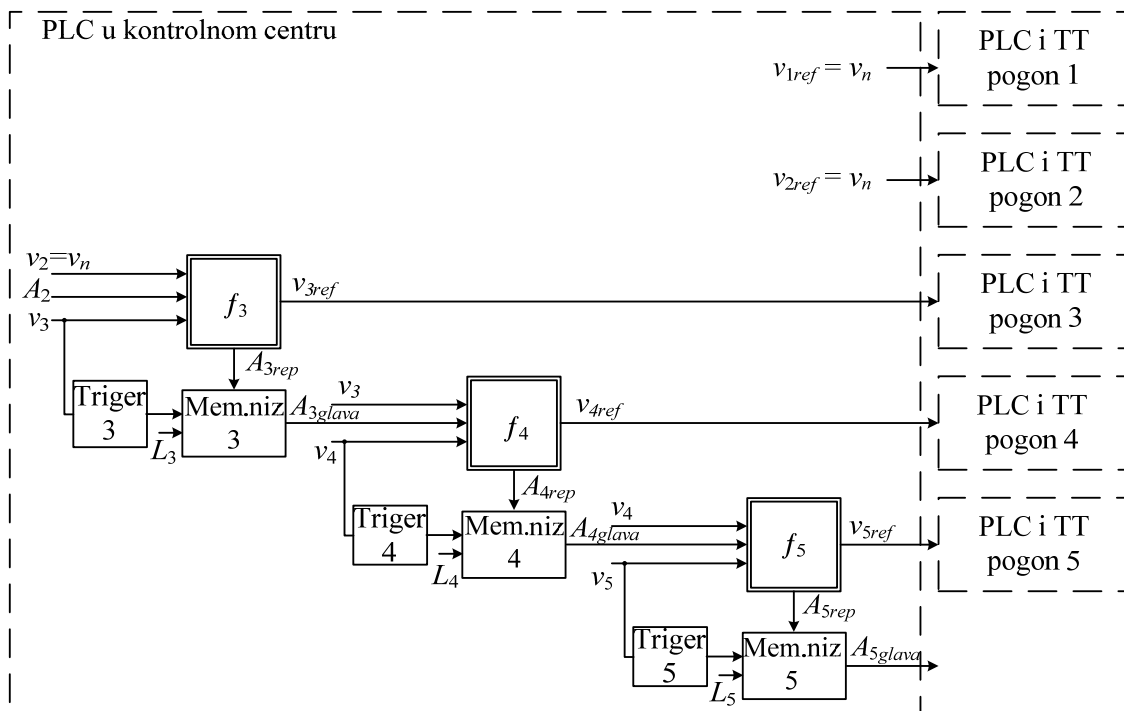
$$R = \frac{L}{\Delta L} \in \mathbb{N}, \quad (5.2)$$

gde je L dužina trake. Prethodno upisana vrednost u prvi registar se u trenutku uzorkovanja pomera u drugi registar, vrednost iz drugog se pomera u treći, itd., vrednost zatečena u poslednjem registru odgovara vrednosti površine poprečnog preseka materijala koji silazi sa trake, i deponuje se na narednu.



Sl. V.7 Određivanje vremena odabiranja

Na Sl. V.8 prikazan je blok dijagram za određivanje referentnih brzina tračnih transportera u sistemu prikazanom na Sl. V.5.

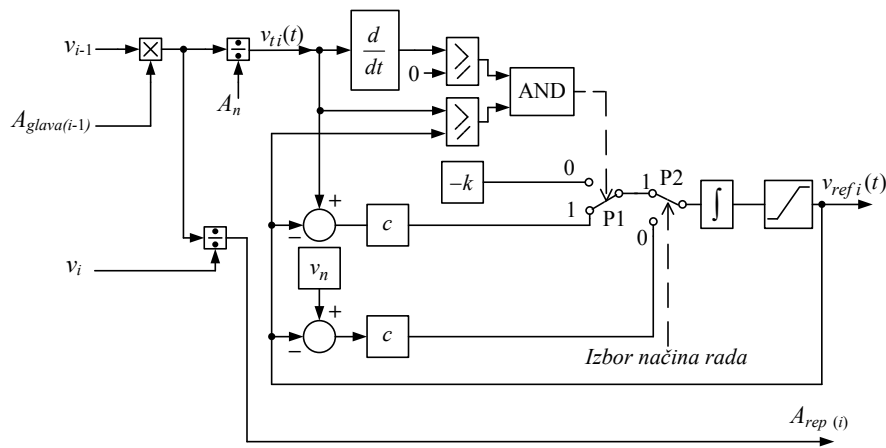


Sl. V.8 Blok dijagram sistema za izračunavanje referentnih vrednosti brzina tračnih transportera TT 3, 4 i 5

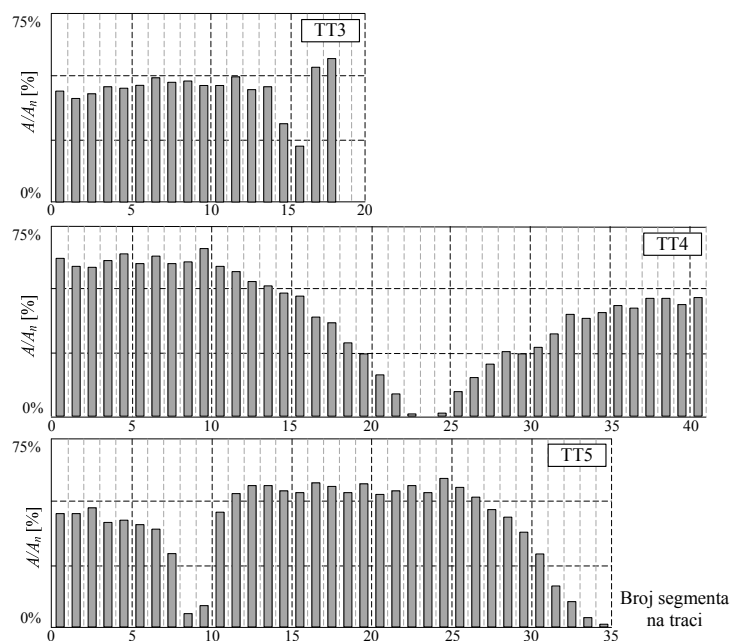
Prva dva tračna transportera imaju stalnu i nazivnu brzinu. Referentna brzina TT3 izračunava se u bloku f_3 na osnovu brzina drugog ($v_2 = v_n$) i trećeg (v_3) tračnog transportera i površine poprečnog preseka materijala izmerenog na glavi TT2 (A_2) pomoću uređaja za merenje. U „memorijskom nizu 3” akumuliraju se podaci o površini poprečnog preseka deponovanog materijala na TT3 u trenutku odabiranja. Izlaz iz „memorijskog niza 3” je informacija o količina materijala koji se deponuje na TT4. Blok

f_4 izračunava referentnu brzinu za TT4 na osnovu brzine TT3, a u „memorijskom nizu 4” se akumuliraju podaci o površini poprečnog preseka deponovanog materijala na TT4 u trenutku odabiranja. Isti princip ponovljen je i za TT5. Na Sl. V.9 prikazana je struktura bloka f sa Sl. V.8. Struktura ovog bloka se razlikuje od bloka sa Sl. IV.2 samo u delu za izračunavanje površine poprečnog preseka materijala koji se deponuje (A_{rep}).

Kada se podaci iz registra bloka „memorijski niz” grafički prikazu u funkciji dužine trake, dobije se podužni profil materijala na tračnom transporteru. Na Sl. V.10 prikazan je izgled podužnih preseka materijala na TT3, 4 i 5. Prikaz ovakvog dijagrama na monitoru pomoću SCADA-e je od velike koristi za upravljanje sistemom tračnih transporetra, jer daje pregled stanja na trakama.



Sl. V.9 Struktura bloka f sa Sl. V.8



Sl. V.10 Trenutni podužni presek materijala na tračnom transporteru

Na osnovu praktičnih provera i iskustava pokazalo se da se zadovoljavajuća tačnost upravljanja brzinom postiže ako se usvoji $\Delta L=25$ m kod tračnog transportera sa nazivnom brzinom do 6 m/s.

V.3. Kontrolni centar

Sistemi tračnih transportera velikih dužina se sastoje od više pogonskih stanica koje su međusobno funkcionalno povezane kako je opisano u prethodnim poglavljima. Obavljanje pojedinih funkcija na samom postrojenju je u prošlosti obavljala posada, koju je obično činio jedan čovek, operater. Njegov posao se sastojao u tome da pripremi postrojenje za rad, uključi napajanje, proveriti stanje opreme, pre puštanja u rad izvrši zatezanje trake, obavi komunikaciju sa susednim pogonskim stanicama, kao i sa dispečerskim centrom da bi dobio informaciju da li može da da komandu za pokretanje. Za vreme rada postrojenja operater prati stanje opreme, i u slučaju pojave smetnji zaustavi sistem, informiše nadležne službe o stanju, itd. Ovakvi sistemi obično rade 24h, u toku cele godine, što podrazumeva rad u smenama, odnosno veći broj zaposlenih. Zbog udaljenosti pogonskih stanica tračnih transportera, otežanog pristupa usled loših terenskih i vremenskih uslova, kakvi na primer vladaju na površinskim kopovima, zamena posada je skopčana je sa nizom problema. Takav način organizacije sistema tračnih transportera ima za posledicu smanjeno vremensko iskorišćenje postrojenja.

Radom sistema savremenih tračnih transportera upravlja se sa jednog mesta, iz kontrolnog centra koji je lociran na lako pristupačnom mestu za ljude, npr. u upravnoj zgradi. Na Sl. V.6 prikazan je princip organizacije jednog kontrolnog centra. Korišćenjem savremenih tehnologija komunikacije u kontrolnom centru su dostupne sve informacije o stanju na svakom tračnom transporteru. Pomoću SCADA sistema može se ostvariti potpuna preglednost svih bitnih elemenata za rad postrojenja. Takođe, moguće je izvesti sve upravljačke funkcije, od uključanja napajanja, preko zatezanje trake, do pokretanja i zaustavljanja sistema.

SCADA sistem u pogledu nadzora i upravljanja pruža velike mogućnosti i pogodnosti, kao što su:

- pregled stanja i rukovanje rasklopnom opremom. Na Sl. V.11 je prikazan izgled ekrana u kontrolnom centru na kome se vidi stanje prekidača u srednjenaponskom razvodnom postrojenju. Pomoću raspoloživih komandi

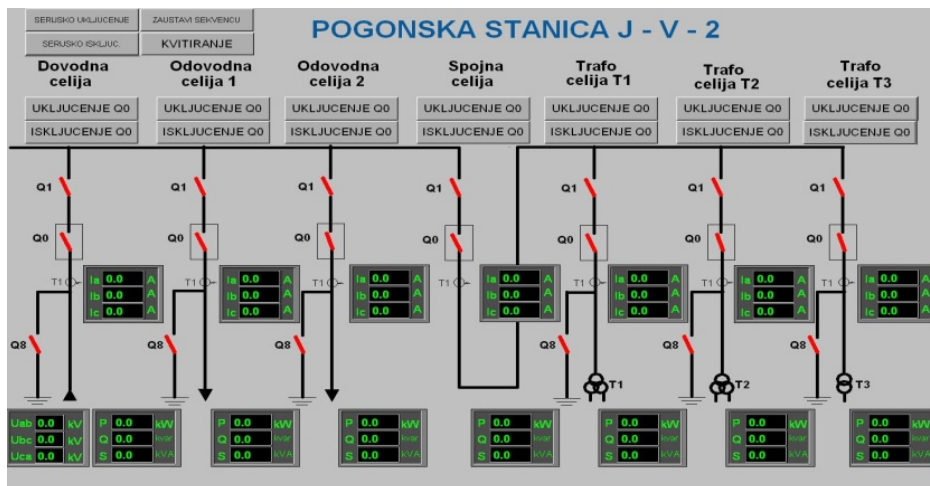
može se vršiti i uključenje i isključenje pojedinih prekidača, kao i automatsko uključenje celog postrojenja po definisanoj proceduri, čime se ubrzava postupak pripreme postrojenja za rad.

- pregled perifernih graničnih prekidača. Na Sl. V.12 prikazana je ekran na kome se vide granični prekidači na pogonskoj stanici tračnog transportera. Reagovanje bilo kog graničnog prekidača se registruje promenom boje odgovarajućeg simbola.
- pregled temperatura. Na Sl. V.13 je prikazan ekran sa pregledom temperatura ležajeva motora i reduktora.
- pored vizuelnog pregleda, u slučaju prekoračenja dozvoljenih vrednosti, ili drugih neregularnih stanja javljaju se odgovarajući zvučni i svetlosni signali. Takođe, takvi događaji se zapisuju, a redosled njihovog nastajanja se može analizirati u slučaju potrebe.
- grafički prikaz promene pojedinih veličina u vremenu je moguće prikazivati, i na taj način pratiti njihov trend.

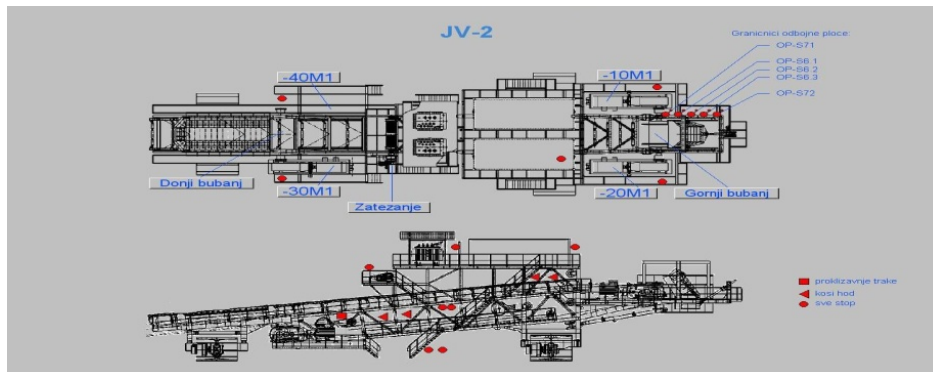
Upravljanjem sistemom sa jednog mesta značajno se povećava njegovo vremensko iskorišćenje. Činjenica da sistemom rukuje samo jedan operater, i automatizacijom pojedinih procedura eliminišu se mnoge subjektivne slabosti tako da se skraćuje vreme za izvršenje potrebnih radnji. Potpuni pregled stanja na sistemu omogućava preventivno održavanje, a u slučaju kvarova služba održavanja pre polaska na objekat ima podatak o potrebnoj intervenciji.

Za potpuno i pravilno funkcionisanje sistema kojim se upravlja iz kontrolnog centra pored komunikacionog sistema, mreže za nadzor i upravljanje, mora da postoji video i audio komunikacija sa objektima sistema. Video nadzor omogućava operateru da prati stanja na karakterističnim mestima, a audio da može da se ostvari komunikacija sa interventnim ekipama, ili sa pratećim službama koje se nalaze na terenu. Pomenuti uređaji se mogu povezati preko Ethernet protokola korišćenjem IP tehnologije, tako da obrazuju jednu posebnu mrežu. Mreža putem koje se vrši upravljanje i mreža putem koje se vrši nadzor, treba da budu hardverski nezavisne, odnosno realizovane sa potpuno zasebnim uređajima, antenama i kablovima. Informacije koje se prenose preko upravljačke mreže imaju visok stepen prioriteta i ne sme se dogoditi da dođe do kašnjenja u prenosu informacija. Sa druge strane video i audio signali nemaju visok

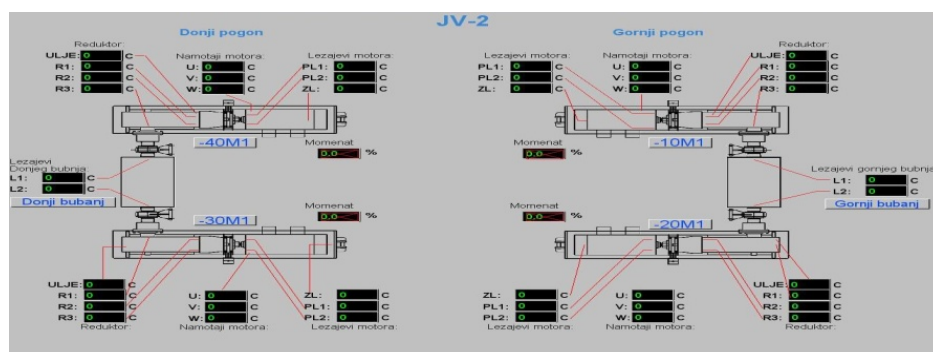
prioritet, ali količina podataka koja se prenosi je velika. Posebno treba naglasiti da svaki prekid komunikacije u okviru mreže za upravljanje dovodi do zaustavljanja sistema, ekvivalentno aktiviranju SVE STOP komande. Na Sl. V.14 prikazane su upravljačka i nadzorna mreža V BTO sistema, koji se sastoji od pet pogonskih stanica tračnih transporterata kojima se upravlja iz kontrolnog centra.



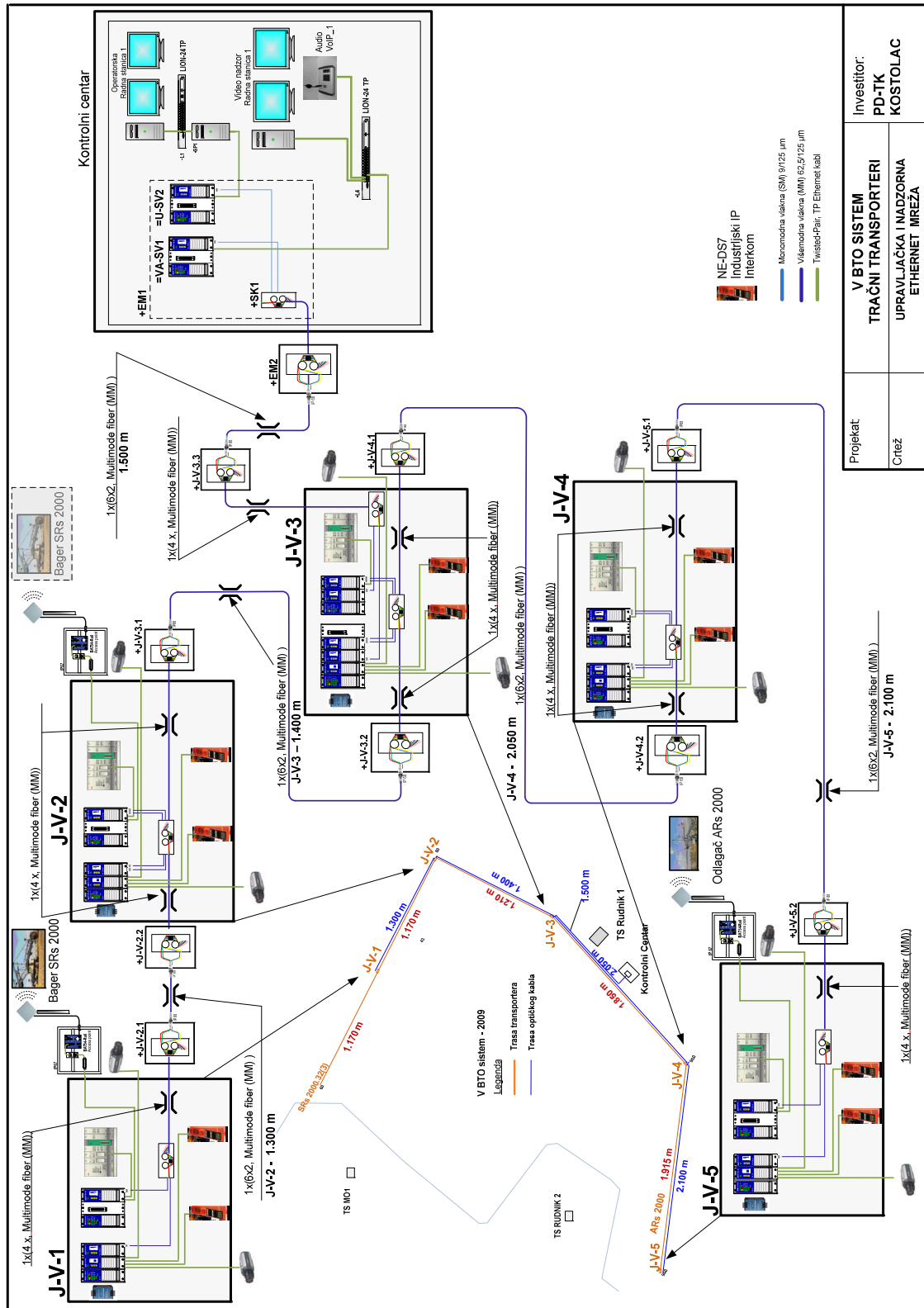
Sl. V.11 SCADA ekran sredjenaponskog postrojenja na pogonskoj stanici tračnog transportera



Sl. V.12 SCADA ekran sa graničnim prekidačima



Sl. V.13 Pregled temperature ležajeva

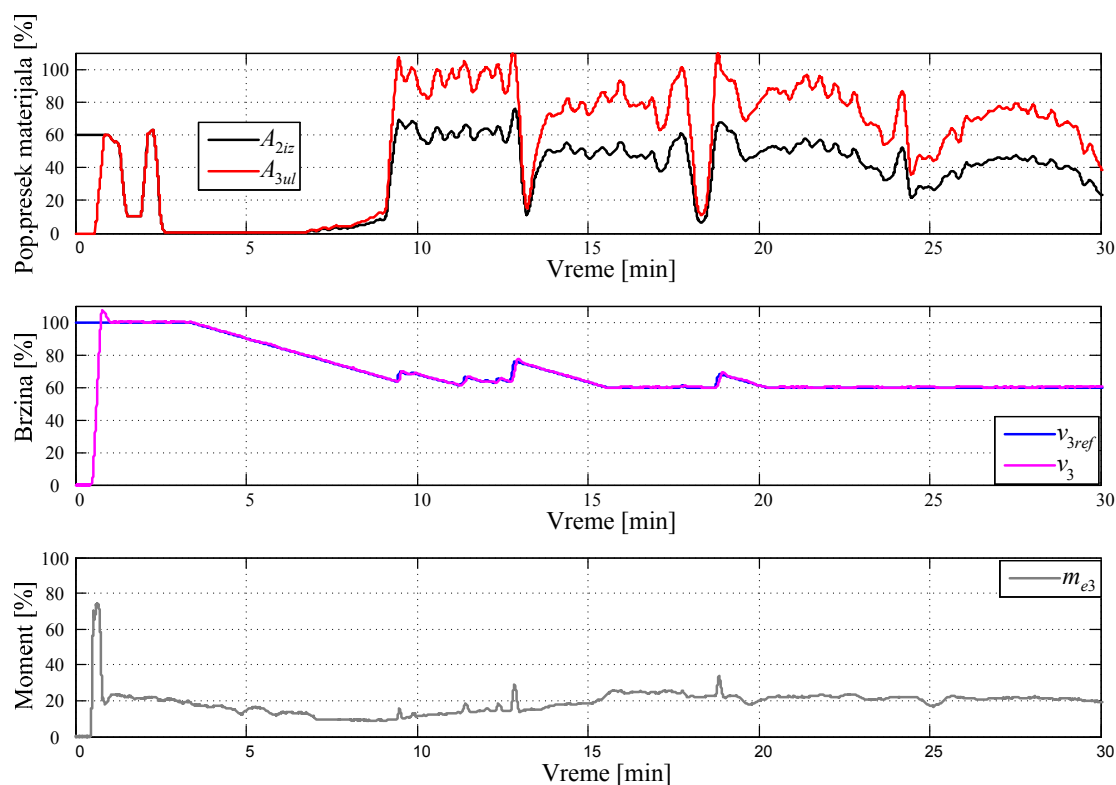


Sl. V.14 Upravljačka i nadzorna mreža

V.4. Analiza rezultata merenja

V.4.1. Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja

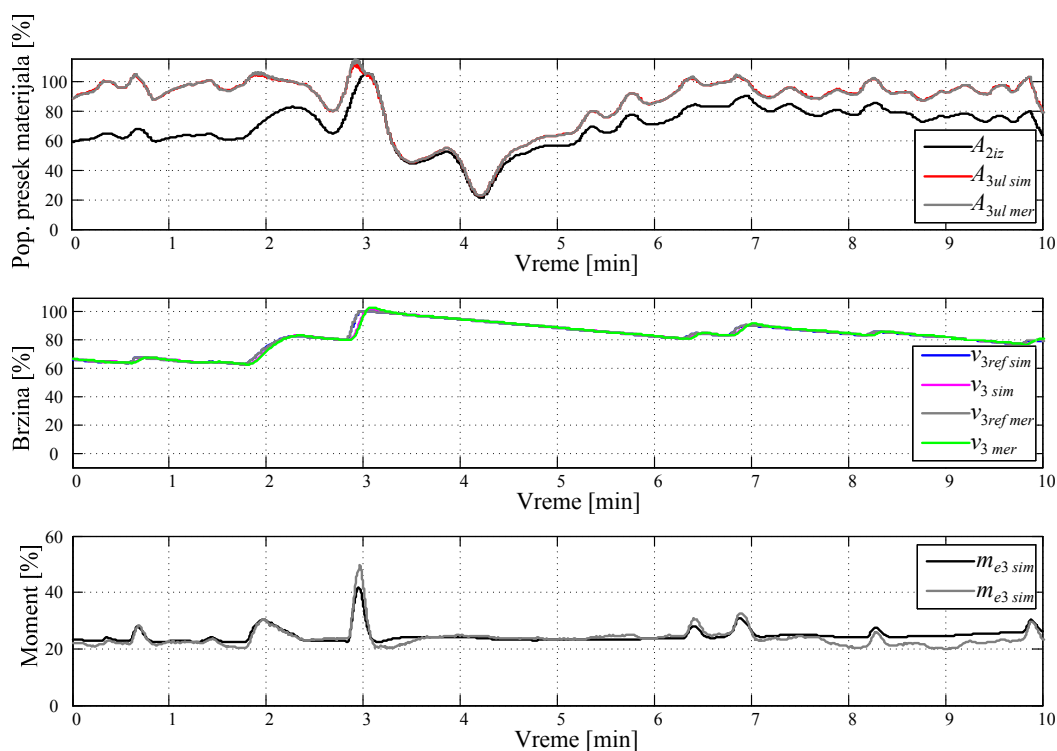
Na implementiranom algoritmu za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja od $k = 0,1$ [% v_n /s], na način prikazan u poglavlju V.2, Sl. V.8 i Sl. V.9, izvršena su merenja karakterističnih veličina, koja su arhivirana korišćenjem funkcija SCADA sistema. Izabrani su za prikaz samo oni slučajevi koji na najbolji način ilustruju performanse primenjenog algoritma i rezultate koji se njegovom primenom postižu. U toku rada sistema na ovaj način, donja granica za referentnu vrednost brzine pri upravljanju podešavana je na 50 ili 60%, prema zahtevima korisnika. Ovde će biti prikazani rezultati za oba slučaja.



Sl. V.15 Karakteristične veličine za prvu veznu traku (treća traka u VBTO sistemu): prelazak iz rada sa stalnom brzinom u rad sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n pri algoritmu sa konstantnim koeficijentom usporenja

Rezultati merenja prikazani na Sl. V.15, potvrđuju rezultate dobijene simulacijom na modelu, prikazane u poglavlju IV.1, na Sl. IV.4 i Sl. IV.5. Jasno se vidi da brzina prati porast materijala na traci, da sistem usporava sa konstantnim

koeficijentom usporenja i da dolazi do očiglednog porasta trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na prvoj veznoj traci (treća traka u VBTO sistemu) u odnosu na dolazeći materijal sa druge etažne trake, u periodima rada sa smanjenom brzinom. Zbog ograničenja brzine sa donje strane na 50%, trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na trećoj traci počinje da opada u trenutku kada brzina postane jednaka donjoj graničnoj vrednosti, a trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala sa druge trake nastavi da opada. Zbog ovog ograničenja, kao i zbog konstantnog koeficijenta usporenja trake, javlja se odstupanje trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na trećoj traci od maksimalne, kao što je to objašnjeno u poglavlju IV.1.1. Na Sl. V.16 prikazane su karakteristične veličine pri radu prve vezne trake (treća traka u VBTO sistemu) pri upravljanju brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja. Dat je uporedni prikaz rezultata simulacije na modelu i rezultati merenja. Odlično slaganje prikazanih rezultata potvrđuje ispravnost dinamičkog modela trake sa primenjenim algoritmom, koji je detaljno opisan u poglavlju IV.1



Sl. V.16 Karakteristične veličine pri radu prve vezne trake (treća traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja: uporedni prikaz rezultata simulacije na modelu i rezultata dobijenih merenjem

Na slikama Sl. V.17, Sl. V.18 i Sl. V.19 prikazan je period zajedničkog rada treće, četvrte i pete trake sa promenom brzine u opsegu od 50% do 100%. Različita priroda signala koji predstavlja merenu vrednost površine poprečnog preseka materijala koji dolazi na treću traku i onog koji predstavlja vrednost površine poprečnog preseka materijala koji dolazi na četvrtu i petu traku, posledica je činjenice da se površina poprečnog preseka materijala meri samo na jednom mestu u sistemu. Na kraju druge trake nalazi se ultrazvučni senzor za merenje površine poprečnog preseka materijala na traci, a ova vrednost se koristi za izračunavanje svih ostalih vrednosti površina poprečnog preseka materijala, na svim ostalim trakama, kao što je opisano u poglavlju V.2. Dakle, samo je vrednost površine poprečnog preseka materijala koji dolazi na treću traku sa kraja druge trake stvarno merena veličina, dok su sve ostale vrednosti izračunavane, pa otuda proističe različita priroda ovih signala.

Analiza rada sistema tračnih transportera sa promenljivom brzinom koja je rezultat rada algoritma sa konstantnim usporenjem, može se izvršiti na osnovu rezultata prikazanih na Sl. V.17, Sl. V.18 i Sl. V.19. Zajednički početni trenutak na vremenskim dijagramima koji su snimljeni za vezne tračne transportere (treći, četvrti i peti) koji rade sa promenljivom brzinom, je trenutak kada trake nastavljaju da rade posle kratkotrajnog prekida. Zatečeno je sledeće stanje na trakama: vrednost referentne brzine jednaka je donjoj graničnoj vrednosti, trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na trećoj traci manja je od 50%, a na četvrtoj i petoj, nešto iznad 60%. Iz prikazanih rezultata može se uočiti da se najveće promene brzine, kao i najveći porast površine poprečnog preseka materijala ima u slučaju prve vezne trake, tj. prve trake u sistemu koja radi sa promenljivom brzinom.

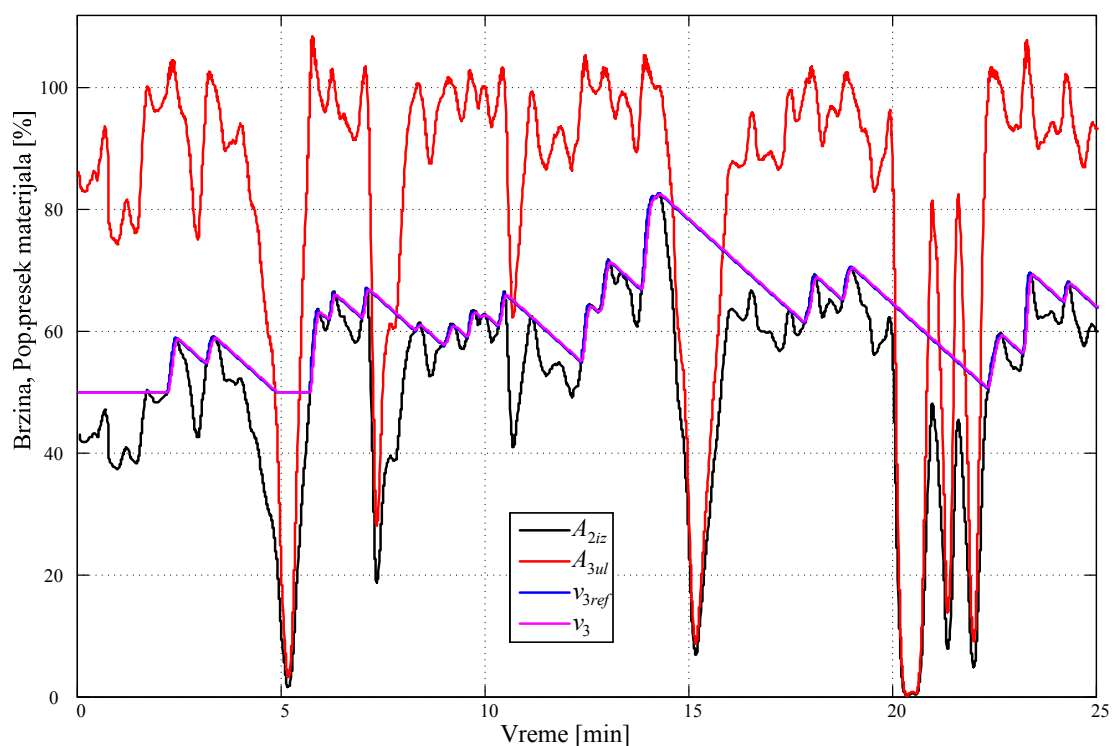
Na osnovu rezultata prikazanih na Sl. V.18, kao i na Sl. V.19, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Teorijska brzina (v_{t4}) za četvrtu traku računa se na osnovu podatka o količini materijala iz poslednjeg registra memorijskog niza za treću traku. Teorijska brzina (v_{t5}) za petu traku računa se na osnovu podatka o količini materijala iz poslednjeg registra memorijskog niza za četvrtu traku.

- Trenutna vrednost površine poprečnog preseka materijala na početku četvrte trake, A_{ul4} , može se izraziti sledećim izrazom: $A_{ul4} = A_{iz3} \cdot v_3 / v_4$. Ako je trenutna brzina veća od teorijske brzine četvrte trake, trenutna vrednost za A_{ul4} će biti manja od trenutne

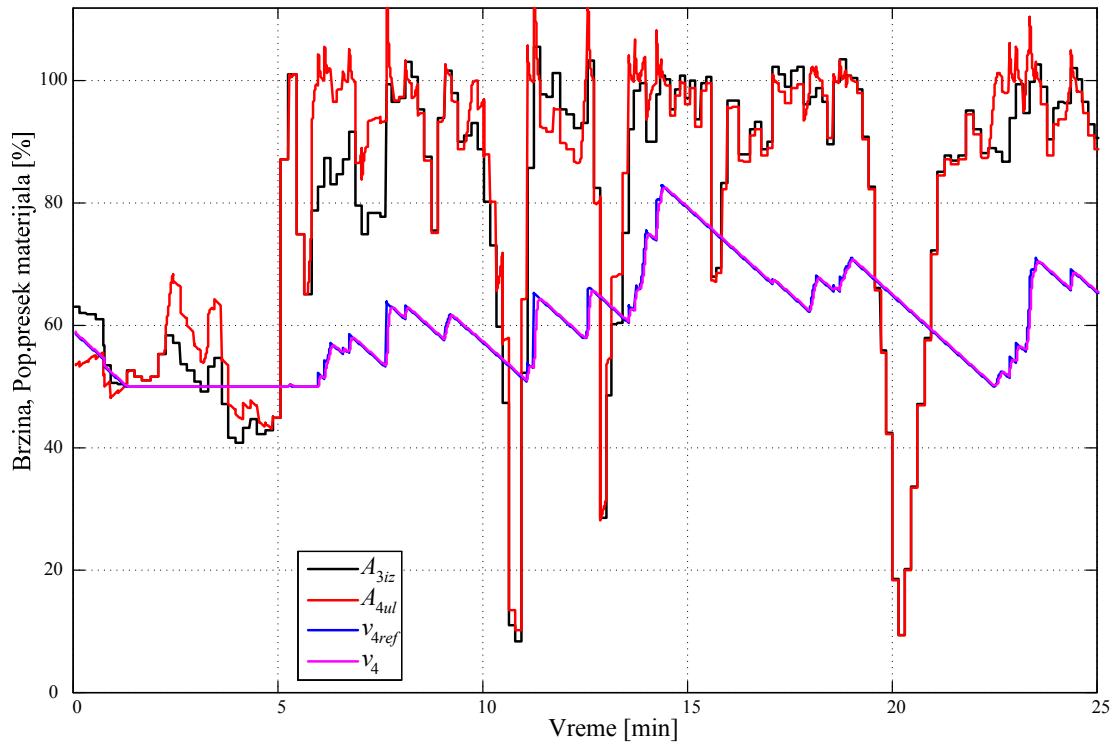
vrednosti površine poprečnog preseka dolazećeg materijala sa treće trake A_{iz3} , što je naizgled u suprotnosti sa onim što želi da se postigne, a to je $A_{ul4} > A_{iz3}$. Već u sledećem trenutku, dejstvom algoritma za generisanje referentne brzine, brzina v_4 će promeniti vrednost, tako da obezbedi maksimalnu popunjenost četvrte trake, ali da ne dođe do presipanja materijala preko ivica trake. Analogno se može izvesti zaključak i za sledeću, tj. petu traku u sistemu.

- Vrednosti A_{ul4} , odnosno A_{ul5} će varirati oko maksimalne vrednosti. „Udubljenja” na vremenskom dijagramu površine poprečnog preseka materijala koji stiže sa prethodne trake, ne mogu se popuniti na sledećoj traci u sistemu upravljanjem brzinom, zbog gore navedenih ograničenja (donja granica za brzinu i konstantan koeficijent usporenja).

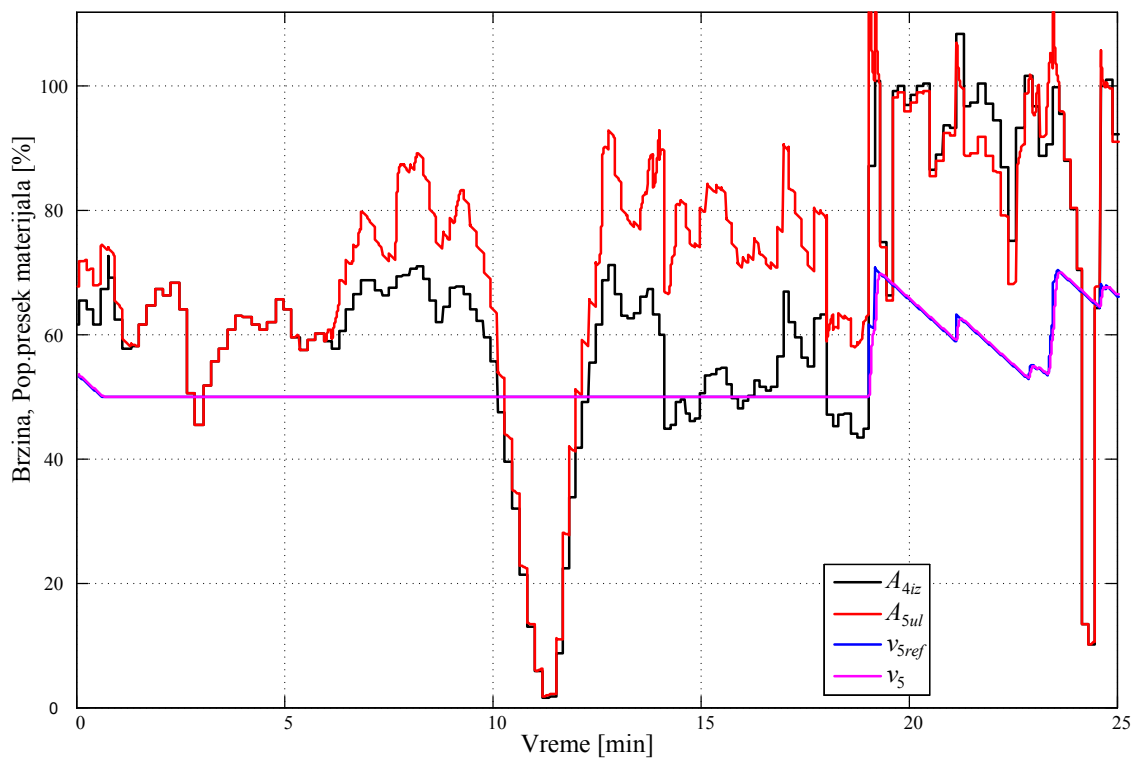


Sl. V.17 Karakteristične veličine pri radu prve vezne trake (treća traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n pri primeni algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja

Zajednička karakteristika vremenskih dijagrama prikazanih na slikama Sl. V.17, Sl. V.18 i Sl. V.19 jesu kratkotrajni prebačaji trenutne vrednosti površine poprečnog preseka materijala na posmatranim trakama iznad 100% pri upravljanju brzinom, pri kojima ipak neće doći do presipanja materijala preko ivica trake, kao što je objašnjeno u poglavlju II.3.6.



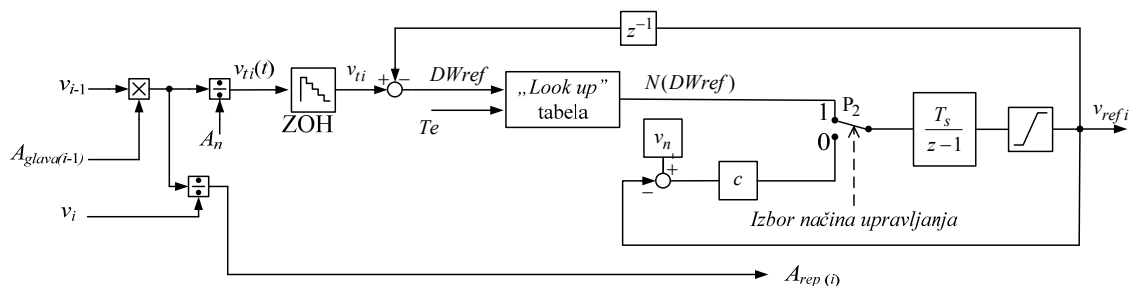
Sl. V.18 Karakteristične veličine pri radu druge vezne trake (četvrta traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n pri primeni algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja



Sl. V.19 Karakteristične veličine pri radu treće vezne trake (peta traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n pri primeni algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja

V.4.2. Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterera na bazi fazi logike

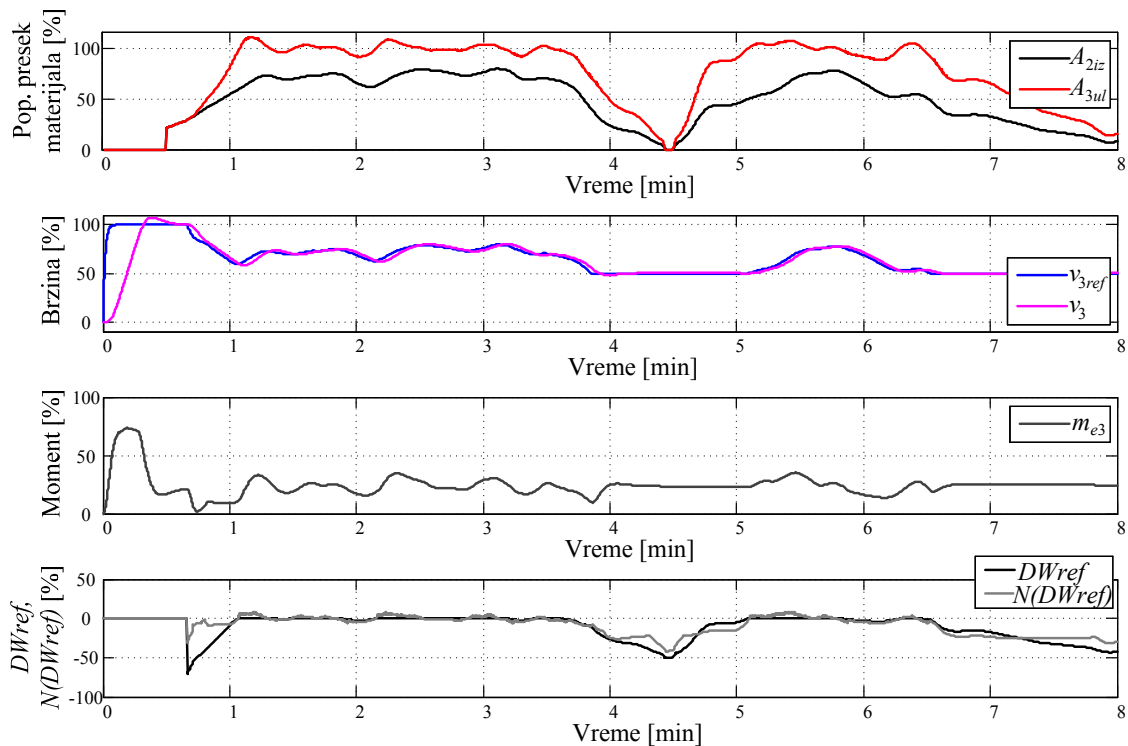
Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterera na bazi fazi logike, koji je opisan u poglavlju IV.2, implementiran je u PLC-u u kontrolnom centru na isti način kao i algoritam sa konstantnim koeficijentom usporenja, prema blok dijagramu prikazanom na Sl. V.8. Razlika je jedino u strukturi bloka f sa Sl. V.8. Struktura ovog bloka, prikazana na Sl. V.20, razlikuje se od bloka sa Sl. IV.10 samo u delu za izračunavanje površine poprečnog preseka materijala koji se deponuje ($A_{rep\ i}$) na rep trake. Sam proračun referentne brzine na bazi fazi logike implementira se u PLC kao „look-up” tabela, korišćenjem linearne interpolacije između dve tačke u tabeli, pri određivanju vrednosti izlazne promenljive.



Sl. V.20 Struktura bloka f sa Sl. V.8

Rezultati dobijeni merenjem na prvoj veznoj traci (treća traka u VBTO sistemu), prikazani su na Sl. V.21. Ovi rezultati su snimljeni implementacijom „look-up” tabele visoke rezolucije u PLC-u, u kontrolnom centru. Kako je primena algoritma na bazi fazi logike potvrdila ponašanje objekta regulacije na očekivan način, isti postupak je trebalo ponoviti i za preostala dva vezna tračna transporterera u sistemu. Tom prilikom se pojavio problem nedovoljnog memorijskog prostora u korišćenom PLC-u, pa je bilo potrebno preći na „look-up” tabelu niže rezolucije. Ovo rešenje je dovelo da manjih odstupanja u vremenskim dijagramima karakterističnih veličina regulisanih tračnih transporterera, u odnosu na primenu „look-up” tabele visoke rezolucije koja verno preslikava rezultat dobijen korišćenjem *Fuzzy Logic Toolbox* - a (*FIS editora*). Ta činjenica ilustrovana je na Sl. V.23, na kojoj je prikazana razlika u vremenskom dijagramu izlazne veličine iz fazi upravljačke strukture NDW_{ref} , dobijene za iste ulazne veličine, u slučaju primene: 1) „fazi bloka”, razvijenog u *Fuzzy Logic Toolbox* - u (*FIS editor*) - $NDW_{ref\ sim}$, i 2) „look-up” tabele niže rezolucije - $NDW_{ref\ mer}$.

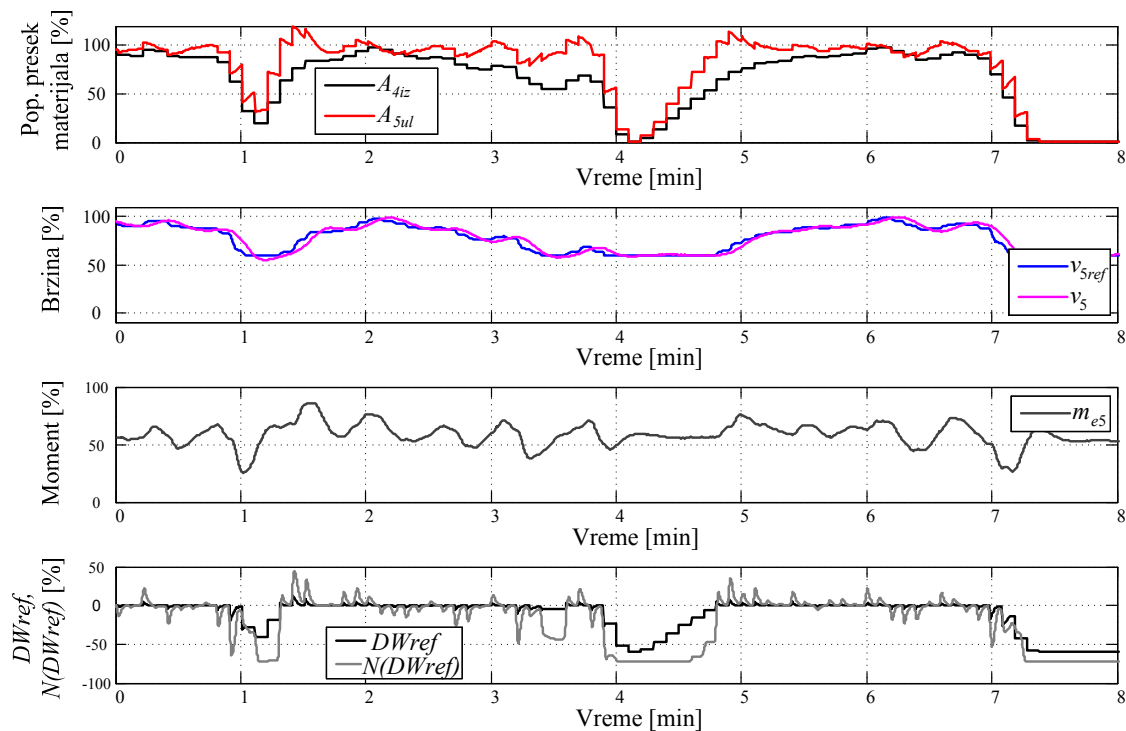
Ulazne veličine u „fazi blok”, odnosno u „look-up” tabelu su DW_{ref} i Te , promenljive čiji su vremenski dijagrami prikazani na Sl. V.22. Na osnovu prikazanih rezultata na Sl. V.23, mogu se uočiti sasvim mala odstupanja u posmatrana dva slučaja, pa se može zaključiti da se na ovaj način nije narušio koncept upravljanja, kao ni kvalitet odziva, te se primenjeno rešenje može smatrati zadovoljavajućim.



Sl. V.21 Karakteristične veličine za prvu veznu traku (treća traka u VBTO sistemu) i ulazne i izlazne veličine iz „look-up” table visoke rezolucije: polazak tračnog transportera i prelazak iz rada sa stalnom brzinom u rad sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n

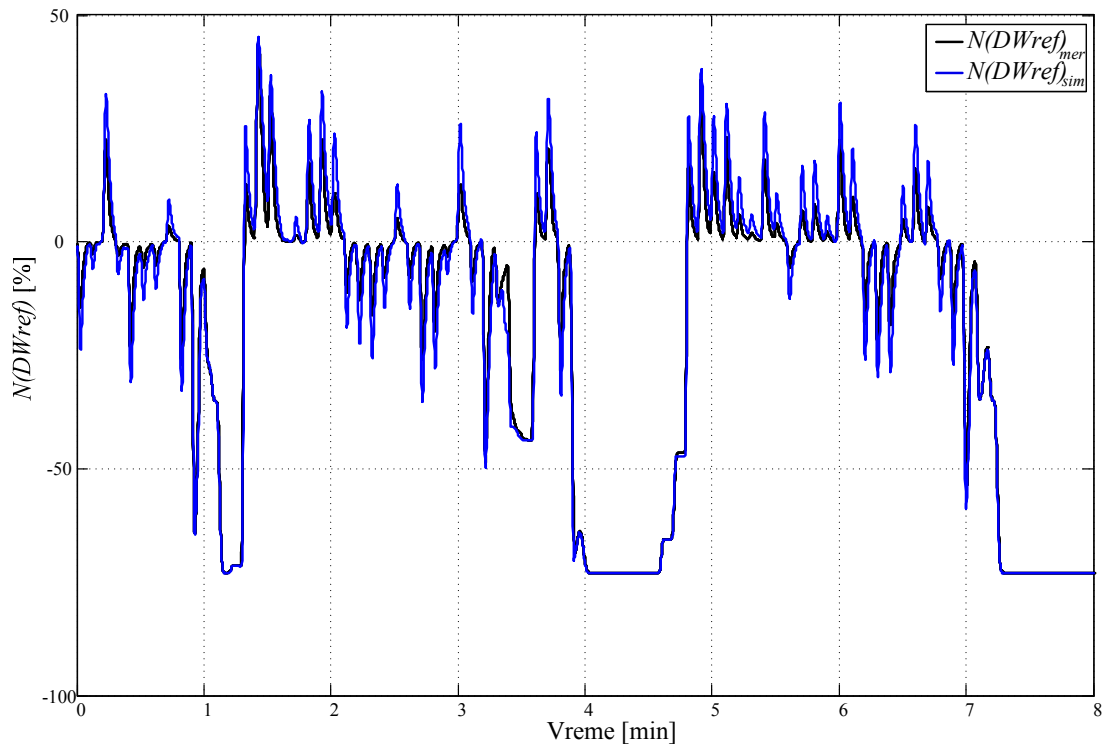
Na Sl. V.22 su prikazane karakteristične veličine za treću veznu traku (peta traka u VBTO sistemu), kao i ulazne i izlazne veličine iz „look-up” table niže rezolucije, pri upravljanju brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n , primenom algoritma na bazi fazi logike, kada su prethodne dve vezne trake radile sa konstantnom, nazivnom brzinom. Kao što je već objašnjeno u V.4.1, različita priroda signala koji predstavlja merenu vrednost površine poprečnog preseka materijala koji dolazi na treću traku i onog koji predstavlja vrednost površine poprečnog preseka materijala koji dolazi na četvrtu i petu traku, posledica je činjenice da se površina poprečnog preseka materijala meri samo na jednom mestu u sistemu, na kraju druge trake, dok se sve ostale vrednosti izračunavaju, na način opisan u poglavlju V.2. Posledica različite prirode ovih signala,

koji predstavljaju ulaz u algoritam za generisanje referentne brzine, jesu dinamičnije i veće promene upravljačkih veličina DW_{ref} i $N(DW_{ref})$. Posledica ove činjenice jesu različiti vremenski dijagrami karakterističnih veličina koje predstavljaju odziv sistema za posmatrani ulaz, a koji se u slučaju prikazanom na Sl. V.22 odlikuju većom dinamikom.



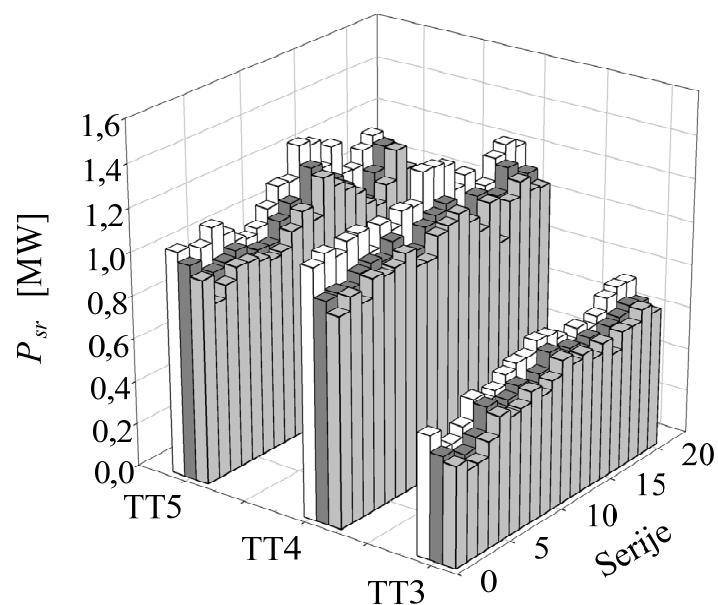
Sl. V.22 Karakteristične veličine za treću veznu traku (peta traka u VBTO sistemu) i ulazne i izlazne veličine iz „look-up” tabele niže rezolucije, pri upravljanju brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n

Rezultati merenja prikazani u oba slučaja, i na Sl. V.21 i na Sl. V.22, potvrđuju da algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transporterata na bazi fazi logike prilagođava brzinu trake u skladu sa količinom materijala na njoj, u cilju povećanja uštede energije u normalnom radu. Promenljivo ubrzanje i usporenje trake se primenjuju na takav način da izazivaju minimalno naprezanje trake i mehaničkih sklopova.

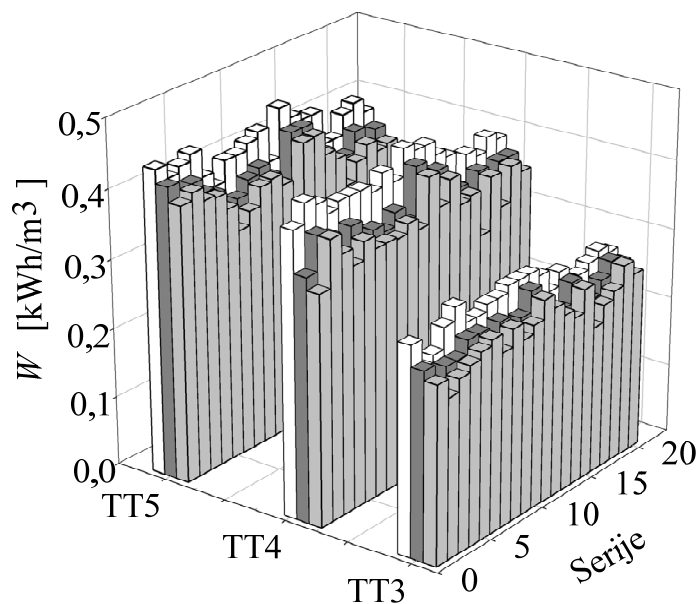


Sl. V.23 Prikaz vremenskih dijagrama dobijenih za izlaznu veličinu iz fazi upravljačke strukture ($NDWref$), za iste ulazne veličine, u slučaju primene: 1) „fazi bloka”, razvijenog u *Fuzzy Logic Toolbox* - u (*FIS editor*) - $NDWref_{sim}$ i 2) „look-up” tabele niže rezolucije - $NDWref_{mer}$

Merenja koja su vršena u dužem vremenskom intervalu na sistemu sa instalisanom snagom od 20 MW, potvrdila su očekivane uštede električne energije. Sistem je radio u sva tri režima rada: povremeno sa stalnom brzinom, povremeno sa brzinom upravljanom primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja, a povremeno sa brzinom upravljanom primenom algoritma na bazi fazi logike, uvek u trajanju od nekoliko sati. Tokom vršenih merenja, dvadeset serija je generisano u različitim uslovima rada. Podaci su snimani za period od 8 meseci, za tri tračna transportera u sistemu. Na Sl. V.24 su prikazani rezultati dobijeni u skladu sa izrazom (4.16) za srednju snagu, grupisani u pojedinačne serije merenja, dok su na Sl. V.25 prikazani rezultati dobijenu u skladu sa izrazom (4.17) za srednju vrednost specifične utrošene električne energije, takođe svrstani u pojedinačne serije podataka. Prikazani rezultati nesumnjivo potvrđuju prednost upravljanja brzinom sistema tračnih transportera u odnosu na rad sa stalnom brzinom u pogledu ostvarenih ušteda energije. Najbolji rezultati se postižu upravljanjem brzinom primenom algoritma na bazi fazi logike.



Sl. V.24 Srednja snaga pogona tračnih transporterata u [MW],
 mereno na trećoj, četvrtoj i petoj pogonskoj stanici (TT3, TT4 i TT5):
 beli stupci - rad sa konstantnom brzinom, tamno sivi stupci - rad pri primeni
 algoritma sa konstantnim usporenjem, svetlo sivi stupci - rad pri primeni algoritma na
 bazi fazi logike



Sl. V.25 Srednja vrednost specifične utrošene električne energije u [kWh/m³],
 mereno na trećoj, četvrtoj i petoj pogonskoj stanici (TT3, TT4 i TT5):
 beli stupci - rad sa konstantnom brzinom, tamno sivi stupci - rad pri primeni
 algoritma sa konstantnim usporenjem, svetlo sivi stupci - rad pri primeni algoritma
 na bazi fazi logike

V.5. Analitička verifikacija izabranog rešenja u pogledu smanjenja potrošnje energije

Na osnovu postupka izloženog u [51], koji je prikazan u analizi korišćene literature u uvodnom poglavlju I.2, primenjen je postupak „*off-line*” estimacije parametara metodom najmanjih kvadrata (*LSQ*) usvojenog „*energetskog modela*” tračnog transportera, i određivanja odgovarajuće brzine u cilju smanjenja utrošene električne energije, pri definisanim ograničenjima sistema. Ovako dobijen rezultat je pod istim uslovima upoređen sa rezultatom koji se dobija primenom algoritma na bazi fazi logike, čime je na analitički način potvrđeno da izabrano rešenje zaista obezbeđuje postavljene uslove, minimalnu potrošnju energije u okviru datih ograničenja.

U radu [51], autori su prikazali novi analitički izraz za izračunavanje mehaničke snage tračnog transportera, tzv. „*energetski model*”. Osnova ovog modela je u standardu ISO 5048 (koji je u saglasnosti sa DIN 22101), a bazira se na metodologiji izračunavanja svih otpora kretanja (primarnih, sekundarnih, otpora kretanja usled nagiba trase i specijalnih). Na osnovu otpora kretanja opisanih u poglavlju II.3.5.1 mogu se identifikovati potrebni koeficijenti u relaciji (5.3), kojom se određuje zavisnost mehaničke snage potrebne za pokretanje transportera, od brzine i kapaciteta u definisanim uslovima rada, odnosno pomenuti „*energetski model*”.

$$P(T, v) = \theta_1 \cdot T^2 \cdot v + \theta_2 \cdot v + \theta_3 \cdot \frac{T^2}{v} + \theta_4 \cdot T + \frac{v^2 \cdot T}{3,6}. \quad (5.3)$$

U izrazu (5.3) P [W] je mehanička snaga, v [m/s] brzina, T [t/h] = γ [t/m³] · Q [m³/h], gde je Q kapacitet tračnog transportera, a θ_1 , θ_2 , θ_3 i θ_4 koeficijenti. Ako se energetski model (5.3) koristi u slučaju nekog realnog tračnog transportera radi određivanja minimuma potrošnje energije u datim radnim uslovima i u okviru aktuelnih ograničenja, onda bi vrednosti četiri koeficijenta trebalo da se estimiraju na realnom postrojenju. Vrednosti koeficijenata se mogu dobiti korišćenjem metoda identifikacije. U industriji se najčešće koriste metoda najmanjih kvadrata (*LSQ*) i rekurzivna metoda najmanjih kvadrata (*RLSQ*, *RLMS*) [75]. U izrazu (5.3), vrednosti za P , v i Q se ili mere *on-line* (npr. kontinualno merenje za potrebe SCADA sistema), ili se dobijaju merenjem na terenu, pa koeficijenti θ_1 , θ_2 , θ_3 i θ_4 mogu da se estimiraju pomoću ovih veličina, da bi se potvrdila tačnost „*energetskog modela*” u odnosu na merenu vrednost ukupne mehaničke snage pogonskih motora. Frekventni pretvarači vrlo često raspolazu mogućnošću estimacije

momenta i brzine motora, a samim tim i mehaničke snage. Ukoliko to nije slučaj, mehanička snaga tračnog transportera se može indirektno dobiti na osnovu električne snage motora kao $P = \eta P_{el}$, gde je η - stepen korisnog dejstva motora. U praksi se odgovarajućom opremom uvek mere P_{el} , v i Q , tako da se lako može primeniti *on-line* parametarska estimacija.

U slučaju *off-line* parametarske estimacije, pre estimacije parametara treba izvršiti normalizaciju veličina, pa se analitički model može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{P}{C} = \left(\frac{c_1}{C} \theta_1 \right) \cdot \frac{T^2 \cdot v}{c_1} + \left(\frac{c_2}{C} \theta_2 \right) \cdot \frac{v}{c_2} + \left(\frac{c_3}{C} \theta_3 \right) \cdot \frac{T^2}{c_3 \cdot v} + \left(\frac{c_4}{C} \theta_4 \right) \cdot \frac{T}{c_4} + \frac{v^2 \cdot T}{3,6 \cdot C}, \quad (5.4)$$

gde je $c_1 = \max(T^2 \cdot v)$, $c_2 = \max(v)$, $c_3 = \max(T^2/v)$, $c_4 = \max(T)$ i $C = \max(P - v^2 \cdot T/3,6)$. Ako se uvedu sledeće oznake:

$$\Psi = \left[\frac{c_1}{C} \theta_1 \quad \frac{c_2}{C} \theta_2 \quad \frac{c_3}{C} \theta_3 \quad \frac{c_4}{C} \theta_4 \right]^T, \quad (5.5)$$

$$\Delta = \left[\frac{T^2 \cdot v}{c_1} \quad \frac{v}{c_2} \quad \frac{T^2}{c_3 \cdot v} \quad \frac{T}{c_4} \right]^T, \quad (5.6)$$

$$P_N = \frac{P}{C} - \frac{v^2 \cdot T}{3,6 \cdot C}, \quad (5.7)$$

izraz (5.4) se može transformisati na sledeći način:

$$P_N = \Psi^T \cdot \Delta. \quad (5.8)$$

U toku merenja na postrojenju, električna snaga (P_{el}), brzina trake (v) i kapacitet (Q) se snimaju u različitim vremenskim trenucima, tako da $P_{el}(k)$, $v(k)$ i $Q(k)$ označavaju izmerene vrednosti u k -tom merenju. Pri tome se mehanička snaga motora računa kao $P(k) = \eta \cdot P_{el}(k)$. Ako se estimacija ne vrši na osnovu merenja na terenu, nego na osnovu rezultata simulacija, kao što je to ovde slučaj, prethodno se može izbeći, tj. vrednost za mehaničku snagu $P(k)$ je dostupna veličina. Ukupan broj merenja (ili simulacija) iznosi N i mora da bude zadovoljen uslov da je $N \geq 4$, zato što treba estimirati vrednosti za 4 parametra. Ako je

$$H = \begin{bmatrix} \Delta^T(1) \\ \vdots \\ \Delta^T(N) \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

i $Z = [P_N(1), \dots, P_N(N)]^T$, metodom najmanjih kvadrata (*LSQ*) dobija se

$$\hat{\Psi} = (H^T H)^{-1} H^T Z. \quad (5.10)$$

Ako je $H^T H$ invertibilna matrica, postoji jedinstveno rešenje za Ψ , tako da se estimirane vrednosti za $\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$, mogu dobiti kao:

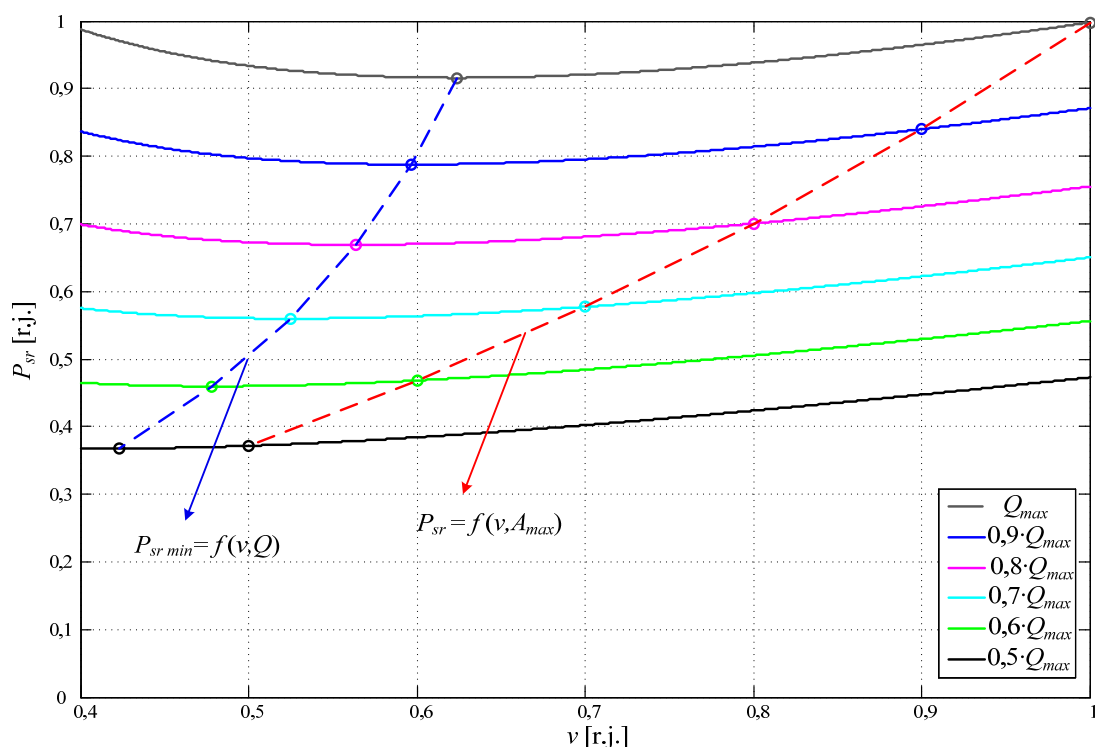
$$\hat{\Theta} = \hat{\Psi} \cdot \begin{bmatrix} C & C & C & C \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{bmatrix}^T. \quad (5.11)$$

U slučaju da je ili brzina ili kapacitet konstantan u izvršenim merenjima, $H^T H$ će postati singularna matrica i *LSQ* parametarska estimacija neće dati rezultate, zato treba biti vrlo pažljiv pri izboru odgovarajućih merenja.

Vršene su brojne simulacije na dinamičkom modelu tračnog transportera koji je verifikovan na terenu i prikazan u poglavlju III.2, pri čemu su varirane vrednosti za kapacitet i za brzinu, a računata je mehanička snaga u ustaljenom stanju. Na osnovu dobijenih podataka izvršena je parametarska estimacija metodom najmanjih kvadrata na opisan način i dobijeni su rezultati za koeficijente θ_1 , θ_2 , θ_3 i θ_4 , čije su vrednosti izražene u [r.j.]: $\Theta = [0,003 \ 1,3022 \cdot 10^5 \ 0.038 \ 70,3359]^T$. Ceo proračun je rađen u normalizovanom domenu, pri čemu su promenljive normalizovane sa baznim vrednostima, koje su određene u skladu sa nazivnim vrednostima za motor i tračni transporter, a koje su date u Prilogu III-1, na kraju poglavlja III.

Za estimirane parametre θ_1 , θ_2 , θ_3 i θ_4 , nacrtana je familija karakteristika $P_{sr} = f(v, Q = \text{const})$, u opsegu brzina od interesa $v = [0.4, \dots, 1]$ [r.j.], koja je prikazana na Sl. V.26. Za brzine manje od 0.4 r.j., izraz (5.3) je neodgovarajući, pa bi se $P_{sr} = f(v, Q)$ morala predstaviti drugačijom funkcionalnom zavisnošću. Na istoj slici predstavljena je i kriva $P_{sr} = f(v, A_{max})$, kao i kriva $P_{sr \min} = f(v, Q)$.

Na osnovu rezultata prikazanih na Sl. V.26, može se zaključiti da se kriva minimalne snage nalazi levo od krive snage u funkciji brzine pri maksimalnoj površini poprečnog preseka materijala na traci (A_{max}). Zbog toga, traka neće moći da se kreće brzinom pri kojoj pogon tračnog transportera ostvaruje apsolutni minimum potrošnje energije, jer bi u tom slučaju došlo do presipanja materijala preko ivica trake. Zbog ovog ograničenja moguće su radne brzine samo desno od krive $P_{sr} = f(v, A_{max})$. Prema tome, stvarni minimum potrošnje energije neće odgovarati apsolutnom minimum srednje snage, već srednjoj snazi određenoj ograničenjem po kapacitetu.



Sl. V.26 Familija karakteristika $P_{sr} = f(v, Q = const)$

Tračni transporteri uvek rade u sistemu sa drugim velikim mašinama, tj. bagerima i odlagačima, u cilju transporta materijala. U skladu sa tim, energetska efikasnost njihovog rada je uslovljena mnogim ograničenjima koja postoje na nivou opreme ili na nivou samog sistema. Da bi se izvršio proces optimizacije po potrošni energije uvedena su sledeće pretpostavke:

1. U svakom trenutku postoji dovoljno materijala da se obezbedi utovar na tračni transporter i na odlagalištu uvek postoji dovoljno mesta da se transportovani materijal smesti.
2. Potrošnja energije u prelaznim procesima pokretanja i zaustavljanja tračnog transportera nije uzeta u obzir.

Energetski model definisan u (5.4), računa mehaničku snagu tračnih transportera. Uvođenjem stepena korisnog dejstva pogona, dati model prelazi u

$$f_P(v, T) = \frac{1}{\eta} \left(\theta_1 \cdot T^2 \cdot v + \theta_2 \cdot v + \theta_3 \cdot \frac{T^2}{v} + \theta_4 \cdot T + \frac{v^2 \cdot T}{3,6} \right), \quad (5.12)$$

gde je $f_P(v, T)$ električna snaga pogonskih motora. Stepen korisnog dejstva celog pogonskog sistema se dobija kao $\eta = \eta_d \eta_m$, gde je η_m stepen korisnog dejstva motora, a

η_d stepen korisnog dejstva frekventnog pretvarača. Utrošena električna energija se određuje iz izraza (5.13),

$$W_{el} = \int_{t_0}^t f_P(v(t), T(t)) dt, \quad (5.13)$$

gde je $[t_0, t]$ vremenski period za koji se računa potrošnja električne energije, a $T(t) = \gamma \cdot Q(t)$.

U praksi, mnogi tračni transporter rade sa smanjenim kapacitetom, a ponekad i sa praznim trakama, zbog različitih radnih okolnosti koja se mogu pojaviti u radu sistema. Ovde je analiziran slučaj optimizacije koji se odnosi na određivanje optimalne brzine tračnog transportera, pri radu sa kapacitetom manjim od nominalnog, u cilju smanjenja potrošnje energije u okviru datih ograničenja. U skladu sa tim, za kriterijumsku funkciju je uzet analitički izraz za utrošenu električnu energiju trake, tako da se traži minimum ove funkcije u okviru definisanih tehničkih ograničenja. Brzina trake i maksimalna masa po jedinici dužine trake se kreću u svojim realnim okvirima i formiraju ograničenja u ovom postupku optimizacije. Kao dodatno ograničenje, uvodi se i opseg u kome može da se nađe izvod brzine, pre svega koeficijent usporenja, koji treba da zadovolji tri potrebna kriterijuma definisana u poglavlju IV.1.2. Dakle, postupak optimizacije se može izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \min W_{el}(v_j, Q_j : 1 \leq j \leq N) &= \sum_{j=1}^{j=N} f_P(v_j, Q_j) t_s \\ \text{pod uslovom da je :} & \\ \left. \begin{aligned} 0,5 \cdot v_{max} &\leq v_j \leq v_{max} \\ \frac{\Delta v_{min}}{t_s} &\leq \frac{v_j - v_{j-1}}{t_s} \leq \frac{\Delta v_{max}}{t_s} \end{aligned} \right\} & \text{linearna ograničenja} \\ 0 \leq M'_{Lj} &\leq M'_{Lmax} & \text{nelinearna ograničenja} \end{aligned} \quad (5.14)$$

gde $Q_{ul} = Q [Q_1, \dots, Q_N]$ predstavlja promenljivi kapacitet, t_s je perioda odabiranja, a $M'_L [\text{kg/m}] = \gamma \cdot Q_{ul} / (3,6 \cdot v)$, masa materijala po jedinici dužine trake. Rešenje postupka optimizacije je optimalna brzina $\bar{v} = [\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_N]$, pri zadatoj vrednosti ulaznog kapaciteta materijala i definisanim linearnim i nelinearnim ograničenjima sistema, tako da tračni transporter radi sa minimalnom utrošenom električnom energijom, tj. sa maksimalnom energetsom efikasnošću. Minimalna i maksimalna brzina trake, kao i minimalni i

maksimalni izvod brzine trake, predstavljaju linearna ograničenja, dok maksimalna masa materijala po jedinici dužine trake, kao funkcija kapaciteta Q i brzine trake v , dakle dve promenljive, predstavlja nelinearno ograničenje.

Traženo rešenje je dobijeno metodom sekvencijalnog linernog programiranja za nalaženje minimuma nelinearne funkcije više promenljivih sa uvažavanjem datih ograničenja. U radu je korišćena funkcija *fmincon* iz MATLAB *Optimization Toolbox*-a [54].

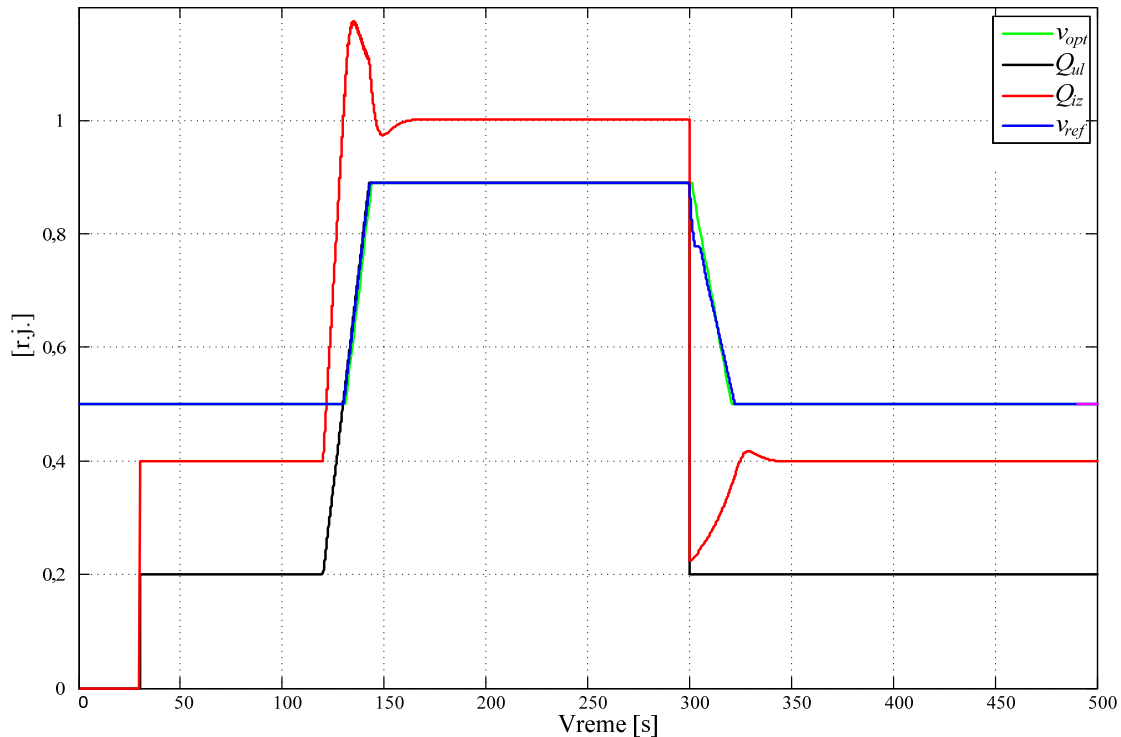
U opštem slučaju funkcija *fmincon* se koristi za nalaženje minimuma neke nelinearne funkcije više promenljivih, pod važećim ograničenjima, tj.

$$\begin{aligned}
 \min_x f(x) \quad & \text{tako da} \\
 c(x) \leq 0, \quad & \text{ceq}(x) = 0, \text{ nelinearna ograničenja} \\
 A \cdot x \leq b, \quad & \text{Aeq} \cdot x = \text{beq}, \text{ linearna ograničenja} \\
 LB \leq x \leq UB, \quad & LB - \text{donja granica ulazne promenljive} \\
 & UB - \text{gornja granica ulazne promenljive}
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

U posmatranom slučaju kriterijumsku funkciju, tj. funkciju čiji se minimum traži, predstavlja ulazna električna energija, funkcija definisana pomoću izraza (5.12) i (5.13), pri čemu su konstante η , $T_{max} = \gamma \cdot Q_{max}$ i M'_{Lmax} , poznate vrednosti za sistem tračnog transportera. Donja granica za brzinu je postavljena na 50% v_n , a gornja na 100% v_n . Perioda odabiranja sa kojom su uzimani odbirci za ulaznu promenljivu, Q_{ul} , iznosi $t_s = 1$ s. Usvojena vrednost za maksimalni koeficijent ubrzanja iznosi 3,3 [% v_n/t_s], što predstavlja odgovarajuću vrednost za ubrzanje, prema literaturi [62], a koja je usvojena prilikom projektovanja pogona transportera. Za maksimalnu vrednost koeficijenta usporenja u posmatranom slučaju, usvojena je vrednost od 2 [% v_n/t_s]. Ova vrednost usporenja je bila ciljna vrednost prilikom projektovanja fazi bloka u okviru algoritma za generisanje referentne brzine transportera.

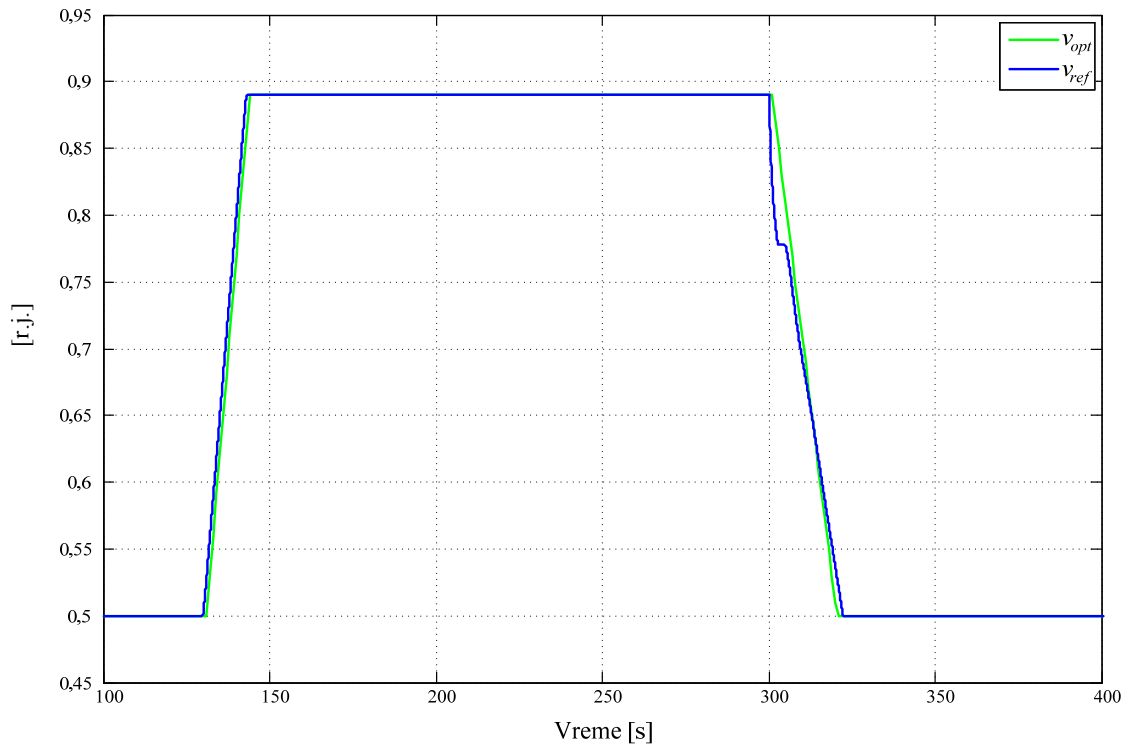
Posmatrana su dva slučaja. U prvom slučaju pretpostavljena je jedna teorijska promena transportovane količine materijala u vremenu, a u drugom slučaju uzeta je jedna tipična promena transportovane količine materijala u vremenu, snimljena na objektu na kome su vršeni eksperimenti. Za oba slučaja određena je brzina transporta pomoću predloženog algoritma na bazi fazi logike, i pomoću funkcije *fmincon* kao je prethodno opisano. Dobijeni rezultati su uporedo prikazani.

U prvom, teorijskom slučaju $Q_{ul}(t)$ prvih 30s ima vrednost nula, zatim ova vrednost naglo raste na 0,2 [r.j.]. U $t = 120s$, Q_{ul} nastavlja da raste sa nagibom od 0,03 [r.j.]/s dok ne dostigne vrednost od 0,89 [r.j.]. U $t = 300s$, Q_{ul} se naglo smanjuje na nulu.

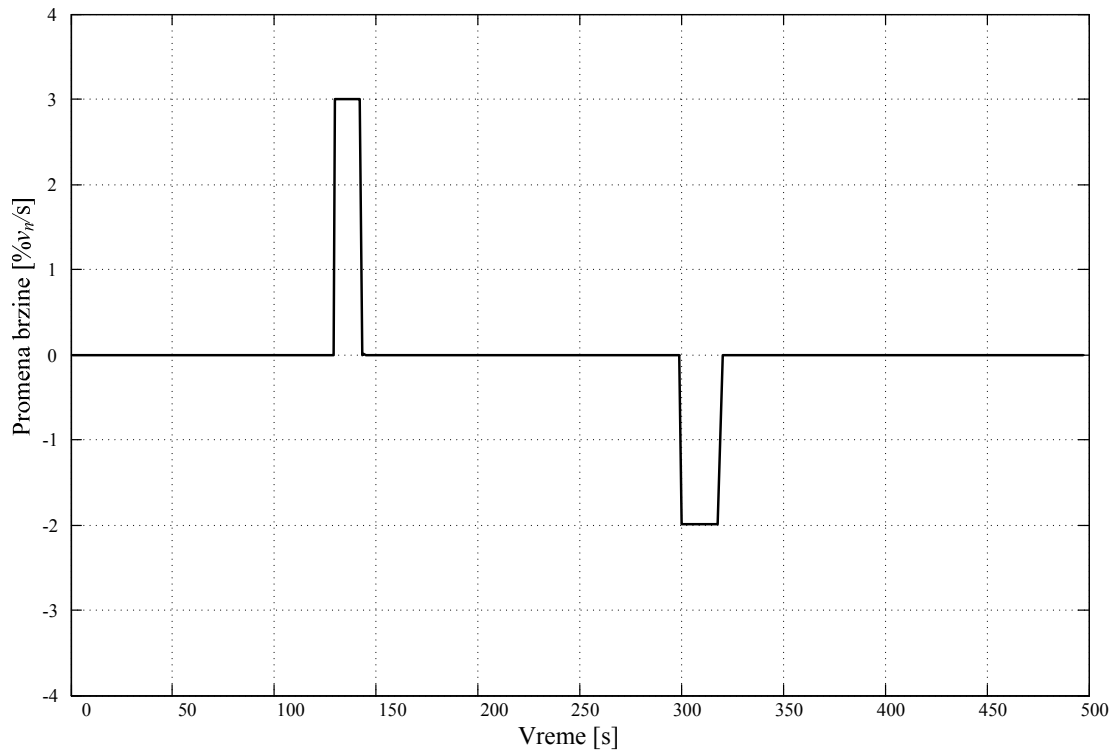


Sl. V.27 Rezultati simulacije dobijeni primenom algoritma na bazi fazi logike i optimalna brzina v_{opt} - rezultat optimizacije dobijen pomoću MATLAB funkcije *fmincon*

Iz rezultata prikazanih na Sl. V.27 i Sl. V.28 može se primetiti dobro slaganje između rezultata za v_{opt} , dobijenog optimizacijom funkcije za ulaznu električnu snagu korišćenjem MATLAB funkcije *fmincon*, i rezultata za v_{ref} , dobijenog primenom algoritma za generisanje referentne brzine na bazi fazi logike, simulacijom na modelu posmatranog tračnog transportera. Ovim je potvrđeno da predloženi algoritam ovde zaista obezbeđuje rad sa minimumom potrošnje energije u datim uslovima i uz postojeća ograničenja. Takođe, pokazano je da su ubrzanje i usporenje na Sl. V.29 u granicama koje su definisane prilikom projektovanja pogona i fazi bloka u algoritmu za generisanje referentne brzine.

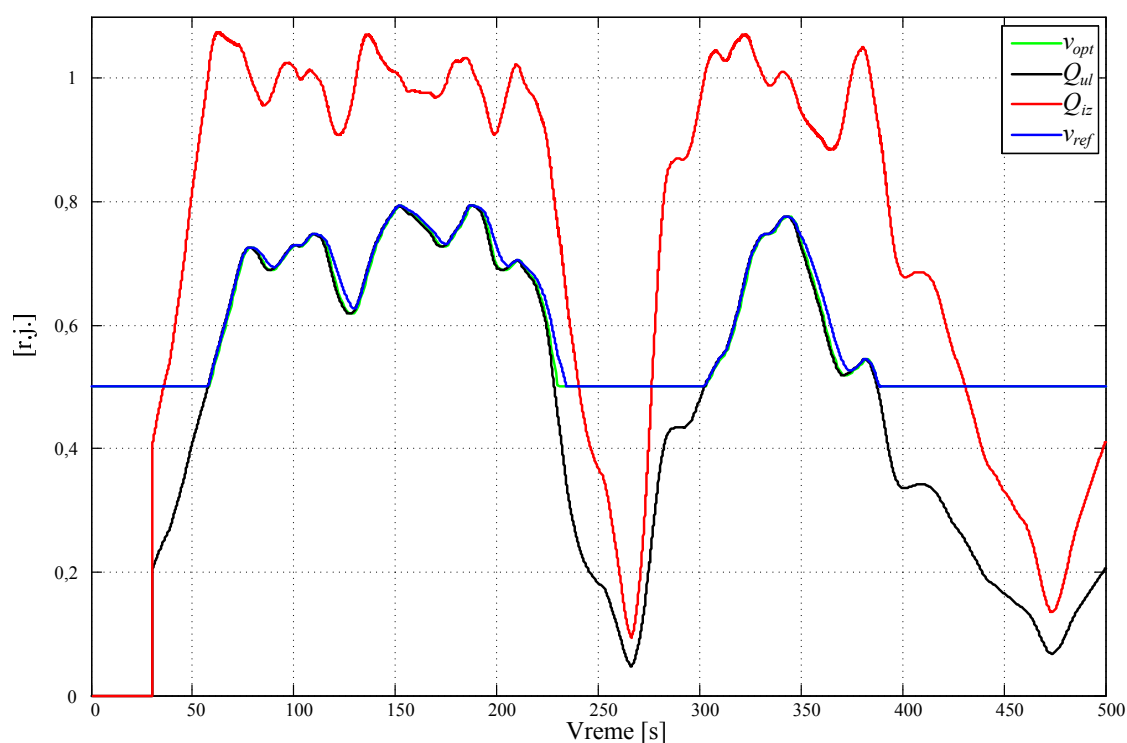


Sl. V.28 Uvećani deo sa Sl. V.27

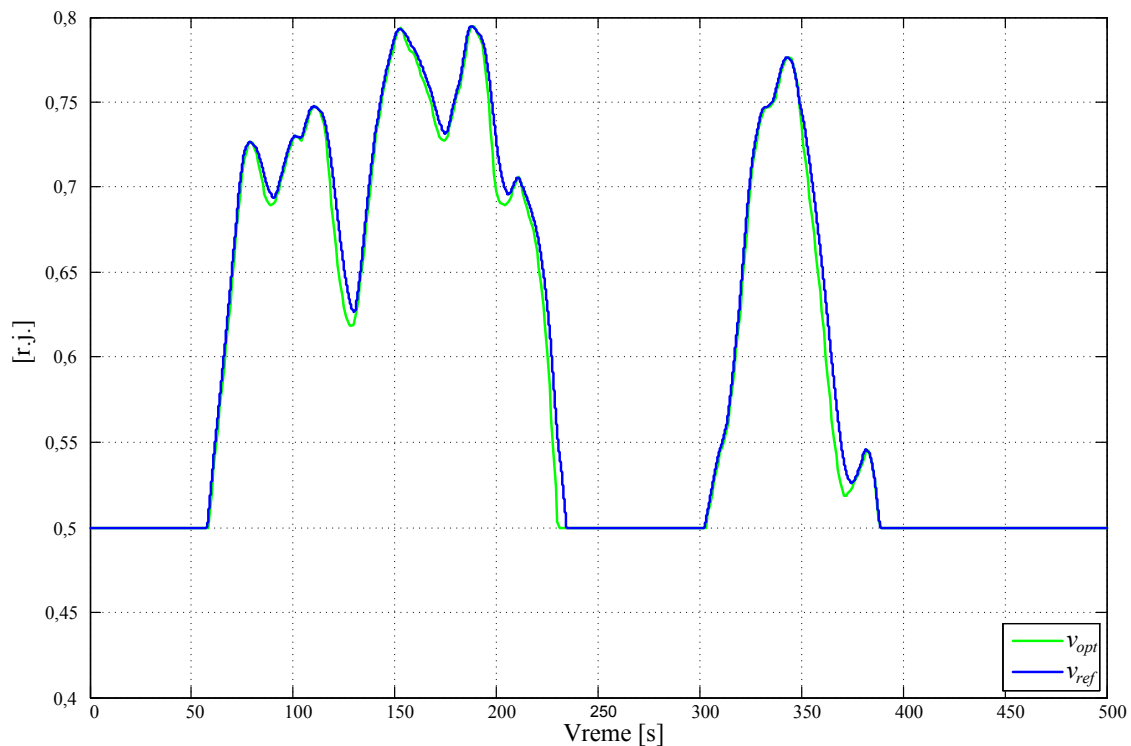


Sl. V.29 Ubrzanja i usporenja u slučaju prikazanom na Sl. V.27, kada je primenjena optimizacija pomoću MATLAB funkcije *fmincon*

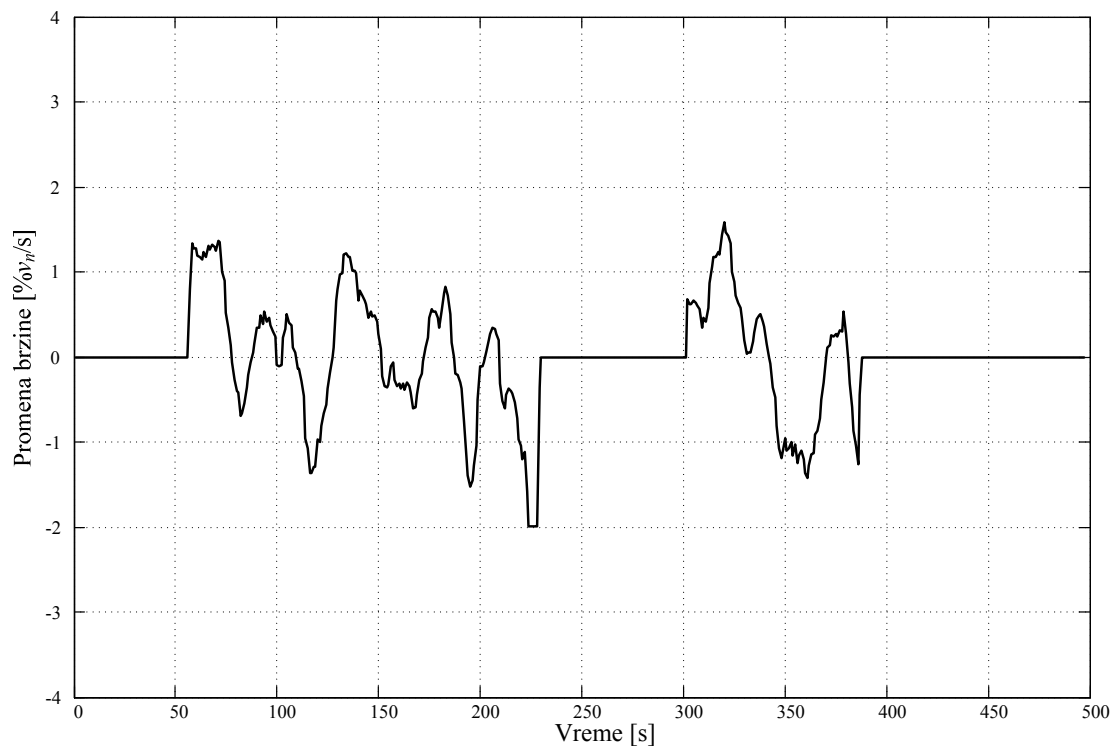
Drugi slučaj koji je posmatran, prikazan je na Sl. V.21, u poglavlju V.4.2. Vremenski dijagram za $Q_{ul}(t)$ je snimljen na realnom sistemu kada je tračni transporter radio sa algoritmom na bazi fazi logike. Na osnovu rezultata prikazanih na slikama Sl. V.30 i Sl. V.31, potvrđeno je da algoritam na bazi fazi logike obezbeđuje postavljene uslove, minimalnu potrošnju energije u okviru datih ograničenja. Rezultati prikazani na Sl. V.32 potvrđuju da se ubrzanja i usporenja u toku optimizacionog procesa kreću u zdatim.



Sl. V.30 Rezultati prikazani na Sl. V.21 (algoritam na bazi fazi logike) i v_{opt} - rezultat optimizacije dobijen pomoću MATLAB funkcije *fmincon*



Sl. V.31 Uvećani deo sa Sl. V.30



Sl. V.32 Ubrzanja i usporenja u slučaju prikazanom na Sl. V.30 kada je primenjena optimizacija pomoću MATLAB funkcije *fmincon*

V.6. Neka praktična iskustva iz rada sistema tračnih transporterata sa promenljivom brzinom

Laboratorija za elektromotorne pogone sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, učestvovala je u projektovanju, nadzoru u toku izgradnje, puštanju u rad, održavanju i različitim vrstama analiza na tračnim transporterima sa regulisanim višemotornim pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača. Ovde će biti prezentovana neka praktična iskustva.

Promena brzine tračnih transporterata ima za posledicu da materijal koji sa glave jednog tračnog transporterata prelazi na naredni tračni transporter raspolaže različitom kinetičkom energijom usled čega je promenljiva trajektorija njegovog kretanja. Konstrukcija mesta presipanja materijala mora biti tako konstruisana da se prilagođava ovim promenama, pomoću odbojnih ploča. Da bi se obezbedila potpuna funkcionalnost sistema, postavljanje odbojnih ploča u odgovarajući položaj mora da se automatizuje u funkciji brzine. Međutim, trajektorija materijala nije samo zavisna od brzine. Ako pretpostavimo da je površina poprečnog preseka materijala na mestu presipanja približno stalna zahvaljujući regulaciji brzine, trajektorija materijala na mestu presipa će zavistiti i od vrste materijala i vlažnosti, odnosno specifične težine. Kako je zavisnost potrebnog položaja klapne nelinearna funkcija brzine i osobine materijala moguće rešenje je u primeni nelinearnog regulatora korišćenjem dvodimenzionalne „*look-up table*” u kojoj bi bili upisani položaji klapne u funkciji brzine i stanja materijala. Opseg regulacije brzine bi trebalo podeliti na potreban broj vrednosti kako bi se dobila dovoljno precizna regulacija položaja. Broj različitih stanja materijala bi zavisio od svojstava materijala koji se transportuje. Izbor stanja materijala bi morao manuelno da se vrši, od strane operatera. To ne bi trebalo da bude problem jer stanje materijala nije često promenljiva veličina kao što je brzina trake. Opisani postupak regulacije se može implementirati u PLC-u. Naravno, za sve ovo potrebno je imati dovoljno kvalitetno merenje položaja klapne, i mogućnost njenog efikasnog pomeranja u željeni položaj.

U toku eksploatacije sistema tračnih transporterata uočeno je da se ležajevi reduktora i motora manje zagrevaju kada se koristi upravljanje referentnom brzinom, odnosno rad sa prosečno nižom brzinom od nazivne, nego kada sistem radi sa stalnom nazivnom brzinom.

Merenja koja su vršena u dužem vremenskom periodu na sistemu instalisane snage od 20MW sa regulisanim višemotornim pogonima sa asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača, pokazala su da je ukupni faktor snage za ceo sistem veći od 0,95, što je još jedan benefit. Izvršena merenja su takođe potvrdila da se ostvaruje očekivana ušteda u pogledu potrošnje električne energije, a prikazani rezultati nedvosmisleno potvrđuju prednosti primene upravljanja brzinom sistema tračnih transporterata u funkciji promenljivog kapaciteta na njegovom ulazu, u pogledu smanjenja potrošnje energije.

VI. Zaključak

Potreba za stalnim poboljšanjem kvaliteta života, vodi ka globalnom porastu potrošnje električne energije, pri čemu se najveći deo električne energije i dalje dobija iz fosilnih goriva. Zbog toga je energetska efikasnost jedan od ključnih elementa u energetske politici svih razvijenih zemalja sveta, jer doprinosi unapređenju ekonomije u celini, produžavajući vek korišćenja neobnovljivih izvora energije. Činjenica je da su najveći elektroenergetski kapaciteti, naročito u Evropi, termoelektrane na uglj, koji se najčešće dobija površinskom eksploatacijom. Povećane potrebe za električnom energijom dovode i do povećanja zahteva za proizvodnjom uglja, odnosno vode i ka povećanju količine uglja i jalovine koju treba transportovati u okviru rudnika sistemom tračnih transporterera. Zbog toga se povećava dužina i kapacitet tračnih transporterera, a time i instalisana snaga njihovih pogona. Zbog značajnih snaga pogona i po pravilu 24-časovnog rada, od posebnog interesa je unapređenje energetske efikasnosti rada tračnih transporterera.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije predstavlja poboljšanje ukupnih performansi sistema tračnih transporterera na površinskim kopovima, na bazi poboljšanja upravljanja elektromotornim pogonima, a u cilju povećanja energetske efikasnosti, kao i pouzdanosti sistema u celini. Detaljnom analizom raspoložive literature i dokumentacije, uočeno je da do sada nisu dovoljno istražene mogućnosti upravljanja sistemom tračnih transporterera podešavanjem brzine u funkciji kapaciteta materijala koji se transportuje, a sa ciljem povećanja energetske efikasnosti sistema u celini.

Cilj istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je razvoj i primena algoritma za generisanje referentne brzine pojedinih transporterera u sistemu transporterera. Na osnovu merenja površine poprečnog preseka materijala na ulazu u sistem tračnih transporterera može se odrediti potrebna brzina kretanja traka koja će obezbediti stalnu maksimalnu popunjenost svake trake u sistemu. Međutim, zbog stalnih značajnih varijacija količine dolazećeg materijala u sistem posmatrano u vremenu, ovakav način rada ne obezbeđuje uvek i energetske efikasan način rada, a može dovesti i do prekomernog habanja elemenata konstrukcije. Primenom različitih algoritama može se kontrolisati ubrzanje i usporenje trake, tako da se u okvirima ograničenja koja nameće sistem obezbedi minimalna potrošnja energije. U toku izučavanja mogućih algoritama, pokazalo se da upravljanje primenom fazi logike predstavlja adekvatno rešenje u pogledu povećanja

energetske efikasnosti sistema, zbog svoje robusnosti i adaptivnosti, jednostavne primene i lakog podešavanja. Dokaz ispravnosti predložene ideje verifikovan je egzaktnim merenjima na postojećem postrojenju.

U radu se polazi od činjenice da se kod konvencionalnih sistema transportera, rastresiti materijal transportuje stalnom, nazivnom brzinom. Pri nazivnom kapacitetu sistema površina poprečnog preseka materijala na traci je optimalana (maksimalana), odnosno traka je maksimalno popunjena. Međutim, istraživanja i statističke analize pokazuju da ovakvi sistemi zbog tehnologije kopanja bagera vrlo retko rade sa punim kapacitetom, odnosno da se veliki deo radnog vremena na trakama nalazi manja količina materijala od maksimalno moguće, pa čak i da prazan hod čini značajan deo radnog vremena sistema. Potrebna snaga za pokretanje sistema traka zavisi od količine transportovanog materijala, ali i od brzine kretanja traka. Imajući u vidu navedene činjenice, nameće se zaključak da je moguće transportovati materijal manjom brzinom od nazivne kada se na trakama nalazi manja količina materijala od maksimalno moguće. Stvarno potrebna brzina kretanja traka se mora određivati u funkciji trenutne količine materijala na njima. Na taj način bi se smanjila srednja brzina i srednja snaga pogona, odnosno, ostvarila bi se značajna ušteda energije.

Prilikom izrade disertacije, kombinovane su teorijske, simulacione i eksperimentalne metode. U prvom delu, izložen je pregled literature iz oblasti aktuelnih načina upravljanja koja se koriste u svetu i kod nas na sličnim sistemima, a u cilju povećanja njihovog vremenskog i kapacitivnog iskorišćenja. Teorijski su obrađeni problemi upravljanja brzinom u funkciji trenutnog kapaciteta u skladu sa ograničenjima koje nameće sistem, a da bi se obezbedila minimalna potrošnja energije. U drugom poglavlju, dat je prikaz tračnog transportera kao dela jalovinskog sistema, tj. vrste tračnih transportera, karakteristike sistema tračnih transportera, osnovni tipovi pogona tračnih transportera, kao i uporedna analiza njihovih karakteristika. Specijalna pažnja je posvećena višemotornim pogonima tračnih transportera sa kaveznim asinhronim motorima koji se napajaju iz frekventnih pretvarača i njihovom načinu upravljanja. Date su osnove proračuna i projektovanja tračnih transportera. U trećem poglavlju, postavljen je detaljan matematički model tračnog transportera, a poređenjem rezultata dobijenih simulacijom na modelu sa rezultatima snimljenim na realnom postrojenju utvrđeno je zadovoljavajuće slaganje. Ovim je omogućeno da se razvijaju i testiraju na

postavljenom modelu različiti algoritmi za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera. Korišćenjem opisanog pristupa i navedenih metoda prvo je detaljno analiziran algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja, kojim se u okviru ograničenja koja nameće sistem ostvaruje smanjena potrošnja energije. Na bazi uočenih karakteristika razvijen je nov način generisanja referentne brzine sistema transportera kojim se poboljšavaju performanse sistema, a pre svega obezbeđuje veća energetska efikasnost. Razvoj predloženog algoritma i dokaz njegovih mogućnosti izvedeni su korišćenjem savremenih naučnih metoda analize i sinteze sistema upravljanja pogonom.

Polazeći od činjenice da je postojeći BTO (bager - traka - odlagač) sistem realizovan sa daljinskim upravljanjem, u glavnom PLC-u koji se nalazi u kontrolnom centru površinskog kopa implementirana su dva osnovna načina rada sistema tračnih transportera: rad sa konstantnom brzinom i rad sa promenljivom brzinom u funkciji trenutnog kapaciteta. Eksperimentalno su ispitana i proverena dva algoritma za određivanje promenljive brzine transportera. Kod prvog algoritma smanjenje brzine se vrši sa unapred definisanim koeficijentom usporenja, a kod drugog se koristi nov predloženi način određivanja brzine transportera primenom fazi logike. Na osnovu rezultata prikupljenih u dužem vremenskom periodu pokazano je da predloženi algoritam na bazi fazi logike daje bolje rezultate u pogledu energetske efikasnosti, a u okviru ograničenja koja su nametnuta konstruktivnim i tehnološkim karakteristikama sistema.

Posebna analitička verifikacija predloženog algoritma izvršena je korišćenjem metode koja se bazira na sekvencijalnom kvadratnom programiranju, a nalazi minimum nelinearne funkcije više promenljivih, sa uvažavanjem datih ograničenja. Za potrebe ove verifikacije prvo je identifikovana nelinearna zavisnost srednje snage pogona transporta u funkciji količine transportovanog materijala i brzine transporta. Zatim su definisana realna ograničenja: minimalna i maksimalna brzina transporta, maksimalno ubrzanje i usporenje i posebno važno ograničenje koje se odnosi na raspoloživi transportni kapacitet. Pomenutom metodom određena je minimalna moguća brzina transporta, tj. optimalna brzina po kriterijumu potrošnje energije, u okviru navedenih ograničenja. Poređenjem dobijenih rezultata sa rezultatima koji su dobijeni u slučaju primene algoritma za generisanje referentna brzine transporta na bazi fazi logike

potvrđeno je da ovaj algoritam zaista obezbeđuje postavljene uslove, minimalnu potrošnju energije u okviru datih ograničenja. Sve navedene tvrdnje su proverene u praktičnoj aplikaciji predloženog algoritma u komercijalnom postrojenju, koje radi 24 sata dnevno, 365 dana godišnje.

Naučni doprinos ove doktorske disertacije je razvoj novog, originalnog algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera, čije su osnovne prednosti:

- smanjenje srednje angažovane snage sistema tračnih transportera,
- smanjenje utrošene energije po jedinici mase transportovanog materijala,
- manje habanje mehaničkih sklopova - smanjenje troškova održavanja,
- povećanje pouzdanosti rada.

Imajući u vidu navedene prednosti predloženog rešenja, i dokazanu mogućnost uspešne primene, očekujemo da će algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera po kriterijumu maksimalne popunjenosti trake, a sa ciljem povećane energetske efikasnosti sistema, biti primenjen na sličnim postrojenjima u našoj zemlji, ali i u svetu.

SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE:

- [1] B. Bose, "Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, pp. 6-17, 2010.
- [2] L. Wei-Jen and R. Kenarangui, "Energy management for motors, systems, and electrical equipment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 602-607, 2002.
- [3] I. Boldea, "Control issues in adjustable speed drives," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, pp. 32-50, 2008.
- [4] J. W. Finch and D. Giaouris, "Controlled AC Electrical Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 481-491, 2008.
- [5] B. K. Bose, "The past, present, and future of power electronics [Guest Introduction]," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, pp. 7-11, 14, 2009.
- [6] E. P. Wiechmann, *et al.*, "On the Efficiency of Voltage Source and Current Source Inverters for High-Power Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1771-1782, 2008.
- [7] M. Malinowski, *et al.*, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 2197-2206, 2010.
- [8] J. Rodriguez, *et al.*, "Novel 20-MW downhill conveyor system using three-level converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 1093-1100, 2002.
- [9] J. Rodriguez, *et al.*, "Regenerative drives in the megawatt range for high-performance downhill belt conveyors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 203-210, 2002.
- [10] A. Boglietti, *et al.*, "Efficiency Analysis of PWM Inverter Fed Three-Phase and Dual Three-Phase High Frequency Induction Machines for Low/Medium Power Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 2015-2023, 2008.
- [11] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1893-1909, 2008.
- [12] A. T. De Almeida, *et al.*, "Standards for Efficiency of Electric Motors," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, pp. 12-19, 2011.
- [13] M. Hajian, *et al.*, "Adaptive Nonlinear Direct Torque Control of Sensorless IM Drives With Efficiency Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 975-985, 2010.

- [14] F. Abrahamsen, *et al.*, "On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, pp. 822-831, 1998.
- [15] D. de Almeida Souza, *et al.*, "Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 2157-2164, 2007.
- [16] F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, "Novel Multiflux Level, Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor for Efficiency and Power Factor Maximization," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 101-109, 2008.
- [17] Y. Pang, "Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control," Phd thesis, Department of Maritime and Transport Technology, Section of Transport Engineering and Logistics, Delft University of Technology, Delft, 2010.
- [18] D. Ignjatović. (2009). *Rudarske mašine, Skripta za studente Rudarskog odseka*. <http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO>
- [19] J. Rodriguez, *et al.*, "Operating experience of shovel drives for mining applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, pp. 664-671, 2004.
- [20] P. Pandit, *et al.*, "Real-Time Power Quality Measurements From a Conventional AC Dragline," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1755-1763, 2010.
- [21] W. G. Koellner, *et al.*, "Recent advances in mining haul trucks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 321-329, 2004.
- [22] G. Mirzaeva, *et al.*, "Evaluation of Current Density in DC Motor Brushes for Mining Machines Based on Air-Gap Field Measurement," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1255-1263, 2010.
- [23] B. Jeftenić, *et al.*, "Optimal Utilization of the Bulk Material Transportation System based on Speed Controlled Drives," in *The XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010*, Rome, Italy, 2010, pp. 1-6.
- [24] B. Jeftenić, *et al.*, "Energy efficiency in transportation of bulk material with frequency controlled drives," in *14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Macedonia, 2010, pp. T5 105-113.
- [25] W. Daus, *et al.*, "Raw Coal Loading and Belt Conveyer System at the Nochten Opencast Mine," *Braunkohle Surface Mining* vol. 50, p. 12, 1998.
- [26] R. A. Gupta and C. Mo-Yuen, "Networked Control System: Overview and Research Trends," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 2527-2535, 2010.

- [27] J. A. Maestro and P. Reviriego, "Energy Efficiency in Industrial Ethernet: The Case of Powerlink," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 2896-2903, 2010.
- [28] B. Jeftenić, *et al.*, "Design and Selection of Belt Conveying Equipment & Systems," in *Design and Selection of Bulk Material Handling Equipment and Systems : Mining, Mineral Processing, Port, Plant and Excavation Engineering*. vol. I, J. Bhattacharya, Ed., I ed Kolkata: Wide Publishing, 2012, p. 254.
- [29] F. J. Hartlief, *et al.*, "Optimieren des kontinuierlichen förderprozesses- automatisieren von tagebaugeräten und -anlagen," *Braunkohle, Surface Mining*, vol. 51, pp. 535-542, 1999.
- [30] F. Petrich, "Optimization of mining technology in the Lusatian mining area," *Surface Mining - Braunkohle and Other Minerals*, vol. 55, pp. 161-176, 2003.
- [31] G. Lodewijks, "Dynamics of Belt Systems," Phd PhD Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, Delft, 1996.
- [32] A. Nuttall, "Design Aspects of Multiple Driven Belt Conveyors," PhD TRAIL Thesis Series no. T2007/12, the Netherlands TRAIL, Research School, TRAIL Research School, Technische Universiteit Delft, Delft, 2007.
- [33] G. Lodewijks, "Two Decades Dynamics of Belt Conveyor Systems," *Bulk Solids Handling*, vol. 22, pp. 124-132, 2002.
- [34] J. Songsiri and B. D, "Dynamic models of servo-driven conveyor system," presented at the TENCON 2004, Chiang Mai, Thailand, 2004.
- [35] I. Biermann, *et al.*, "Belt - Conveyor - Systems Motion Control Simulation," in *European Simulation Symposium - ESS2001* Marseille, France, 2001, pp. 407-413.
- [36] X. Xia and J. Zhang, "Control systems and energy efficiency from the POET perspective," in *In the Proc. of IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency*, Vilamoura, Portugal, 2010, pp. 1-6.
- [37] M. A. Alspaugh, "Latest Developments in Belt Conveyor Technology," in *MINExpo*, Las Vegas, Nevada, 2004.
- [38] B. Gerard and L. O'Rourke, "Optimisation of overland conveyor performance," *Australian Bulk Handling Review* February 2009.
- [39] A. G. Tapp, "Energy Saving Troughing Idler Technology," *Bulk solids handling*, vol. 20, pp. 437-449, 2000.
- [40] B. T. Ralf, *et al.*, "Energy efficiency in opencast mine production systems," *Surface Mining - Braunkohle and other Minerals*, vol. 61, p. 8, 2009.

- [41] A. K. Mukhopadhyay, *et al.*, "Energy efficient idler for belt conveyor systems," *Bulk Solids Handling*, vol. 29, p. 14, 2009.
- [42] M. Jansen, "The development of energy optimized conveyor-belts - A joint project of Conveyor belts Group of ContiTeh AG and RWE Power AG," *World of Mining*, vol. 60, pp. 83-87, 2008.
- [43] H. Dunn, "WHY USE ELECTRONIC VARIABLE SPEED DRIVES ON CONVEYOR APPLICATIONS," in *Beltcon 10*, Johannesburg, South Africa, 1999, p. 4.
- [44] U. Köhler, *et al.*, "Variable-Speed Belt Conveyors Gaining in Importance," *Braunkohle, Surface Mining*, p. 7, 2001.
- [45] C. Landy, "Vector controlled variable speed drives - a variable alternate for driving conveyors," in *Beltcon 10*, Johannesburg, South Africa, 1999, p. 9.
- [46] H. Lauhoff, "Speed Control on Belt Conveyors - Does it Really Save Energy?," *Bulk solids handling*, vol. 25, p. 10, 2005.
- [47] B. Kolonja, *et al.*, "Opravdanost primene trakastih transportera sa frekventnom regulacijom brzine na površinskim kopovima EPS-a," Studija rađena za potrebe EPS-a, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu i Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2005.
- [48] Z. KASZTELEWICZ and J. SZYMAŃSKI, "Energy saving control method of electrical drives in conveyor belts with regulated speed in surface brown coal mine," *Arch. Min. Sci.*, vol. 53, pp. 319-329, 2008.
- [49] ABB_Process_Industries and O. P. M. M. Handling, "Variable-speed drives for belt-conveyor systems," ABB Process Industries, Cottbus, Germany, November 2000.
- [50] D. Junghans, "Modern Drive Technology for Belt Conveyors," *Bulk solids handling*, vol. 21, p. 4, 2001.
- [51] S. Zhang and X. Xia, "Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors," *Applied Energy*, vol. 88, p. 11, 2011.
- [52] A. Middelberg, *et al.*, "An optimal control model for load shifting - With application in the energy management of a colliery," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1266-1273, July–August 2009.
- [53] S. Zhang and X. Xia, "Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 1929-1937, 2010.
- [54] *Optimization Toolbox User's Guide For Use with MATLAB, Version 2.*
www.mathworks.com

- [55] D. D. I. f. Normung, "DIN 22101: Continous conveyors, Belt conveyors for loose bulk materials, Basics for calculation and dimensioning," ed, 2002, p. 51.
- [56] C. E. M. Association, "CEMA Belt book, Sixth Edition," ed, 2005, p. 599.
- [57] Goodyear, *Handbook of Conveyor and elevator belting*, 1975.
- [58] "Phoenix", *Conveyor Belts Design Fundamentals*. Hamburg: P H O E N I X C O N V E Y O R B E L T S Y S T E M S, 2004.
- [59] B. Jeftenić, *et al.*, *Višemotorni električni pogoni*. Beograd: Akademska misao, 2011.
- [60] *Kelvin–Voigt material*
http://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin%E2%80%93Voigt_material
- [61] B. Kolonja, *et al.*, "The application of frequency converters for the regulation of belt conveyor drives in surface mining," *Transport & Logistics*, vol. 05, pp. 11-27, 2003, December
- [62] Y. Pang and G. Lodewijks, "Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control," in *Logistics and Industrial Informatics (LINDI), 2011 3rd IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 159-164.
- [63] Y. Leehter, "Fuzzy control of belt conveyor in the manufacturing process," in *International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, 1995.*, 1995, pp. 748-754.
- [64] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [65] prof. dr Đurović Ž., *Predavanja za predmet Prepoznavanje oblika*
http://automatika.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=37&Itemid=166
- [66] G. C. D. Sousa, *et al.*, "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, pp. 192-198, 1995.
- [67] M. Suetake, *et al.*, "Embedded DSP-Based Compact Fuzzy System and Its Application for Induction-Motor V/f Speed Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 750-760, 2011.
- [68] T. Orłowska-Kowalska, *et al.*, "Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Control of the Two-Mass Induction Motor Drive Without Mechanical Sensors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 553-564, 2010.
- [69] M. A. Fnaiech, *et al.*, "Fuzzy Logic and Sliding-Mode Controls Applied to Six-Phase Induction Machine With Open Phases," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 354-364, 2010.

- [70] J. Jamaludin, *et al.*, "An Elevator Group Control System With a Self-Tuning Fuzzy Logic Group Controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 4188-4198, 2010.
- [71] P. Mun-Soo, *et al.*, "Antisway Tracking Control of Overhead Cranes With System Uncertainty and Actuator Nonlinearity Using an Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 3972-3984, 2008.
- [72] J. Lin and R. J. Lian, "Intelligent Control of Active Suspension Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 618-628, 2011.
- [73] L. B. Ristić and B. I. Jeftenić, "Implementation of Fuzzy Control to Improve Energy Efficiency of Variable Speed Bulk Material Transportation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 2959-2969, 2012.
- [74] S. S.N., *et al.*, *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*: Springer, 2007.
- [75] prof. dr Kovačević B. *Predavanja i vežbe za predmet "Modeliranje i identifikacija procesa (OS3MIP)"*.
http://automatika.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=24&Itemid=153

Biografija autora

Leposava Ristić, rođena 26. novembra 1965.god. u Šekovićima BiH, osnovnu i srednju školu završila je u Beogradu. Elektrotehnički fakultet, odsek energetski, smer elektroprivreda, upisala je 1984.god u Beogradu. Diplomirala je 29.06.1990.god sa prosečnom ocenom tokom studiranja 8.34 i ocenom diplomskog rada 10.

Od novembra 1990.god do juna 1991.god bila je u radnom odnosu na određeno vreme u Elektrotehničkoj delatnosti JŽTP na poslovima održavanja elektroenergetskih objekata. Od oktobra 1991.god do 31.05.1995.god radila je kao asistent pripravnik na katedri za električne mašine i elektromotorne pogone na Elektronskom fakultetu u Nišu. Od 1.06.1995.god zaposlena je kao asistent pripravnik na katedri za energetske pretvarače i pogone, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Postdiplomske studije, smer Energetski pretvarači i pogoni, upisala je 1991.god na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Odbranila je magistarsku tezu pod naslovom „Razvoj algoritma za minimizaciju snage gubitaka elektromotornog servo pogona sa asinhronim motorom” i stekla akademsko zvanje magistra elektrotehničkih nauka za oblast Energetskih pretvarača i pogona, 23.04.1999.god, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Na radno mesto asistenta pri Katedri za energetske pretvarače i pogone postavljena je 25.05.1999.god.

Leposava Ristić je autor ili koautor na više radova za međunarodne i domaće časopise. Osim toga, objavila je i prezentovala brojne radove na međunarodnim i domaćim konferencijama i bila učesnik na velikom broju projekata. Držala je računске i laboratorijske vežbe na više različitih predmeta iz oblasti električnih mašina i elektromotornih pogona, koji predstavljaju i osnovne oblasti njenog interesovanja.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Развој алгоритма за повећање енергетске ефикасности система трачних транспортера на површинским коповима

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 21. 05. 2012.

Милош Ристић

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.