

**Optimizacija procesa:
Pogoni sa tračnim
transporterima**

Podsetnik: Kako se može povećati EE pogona?

- Sa strane napajanja;
- U pretvaraču;
- Optimizacija radne tačke motora;
- Korišćenjem EE mehaničkog prenosnika;
- U procesu, rad u EE radnoj tački

Podsetnik: EE radna tačka

- Mogućnost izbora EE radne tačke zavisi od:
 - vrste opterećenja,
 - tehnološkog procesa,
 - uslova rada,
 - kapacitivnog iskorišćenja postrojenja.
- Mogućnost izbora EE radne tačke bazira na pronalaženju optimalnog odnosa brzine i momenta.

$$\textit{snaga} = \textit{brzina} \times \textit{momenat}$$

***min snaga = optimalna brzina x optimalan
momenat***

SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

UVOD

- **Najveći deo električne energije dobija se iz uglja** u mnogim zemljama, npr. u Srbiji je 62% svih kapaciteta za proizvodnju električne energije u termoelektranama na ugalj, a 65% proizvedene električne energije dobija se iz ovih elektrana [1].
- 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**.

UVOD

- U postrojenjima i sistemima gde se koriste tračni transporteri, njihova instalisana snaga skoro uvek predstavlja značajni deo ukupne instalisane snage, što znači da je **njihova potrošnja dominantna u ukupnoj potrošnji energije**. Zbog toga je problem uštede energije u slučaju tračnih transportera od posebnog značaja za korisnika datog postrojenja.
- 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 [2].

UVOD

- U rudnicima sa površinskom eksploatacijom postoje dva načina kopanja:

1. diskontinualno (ciklično) kopanje,

gde se za kopanje koriste bageri sa jednim radnim elementom, 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.) ili elastično (bager sa povlačnom - dreglajnskom kašikom, bager sa kašikom grabilicom - grejfer, bager sa kukom za dizanje i premeštanje tereta - kran, i dr.), a transport materijala se vrši kamionima. Ovaj način kopanja je karakterističan za rudnike manjeg kapaciteta, i za rudnike gde je materijal koji se otkopava veće tvrdoće [3].

2. kontinualno kopanje,

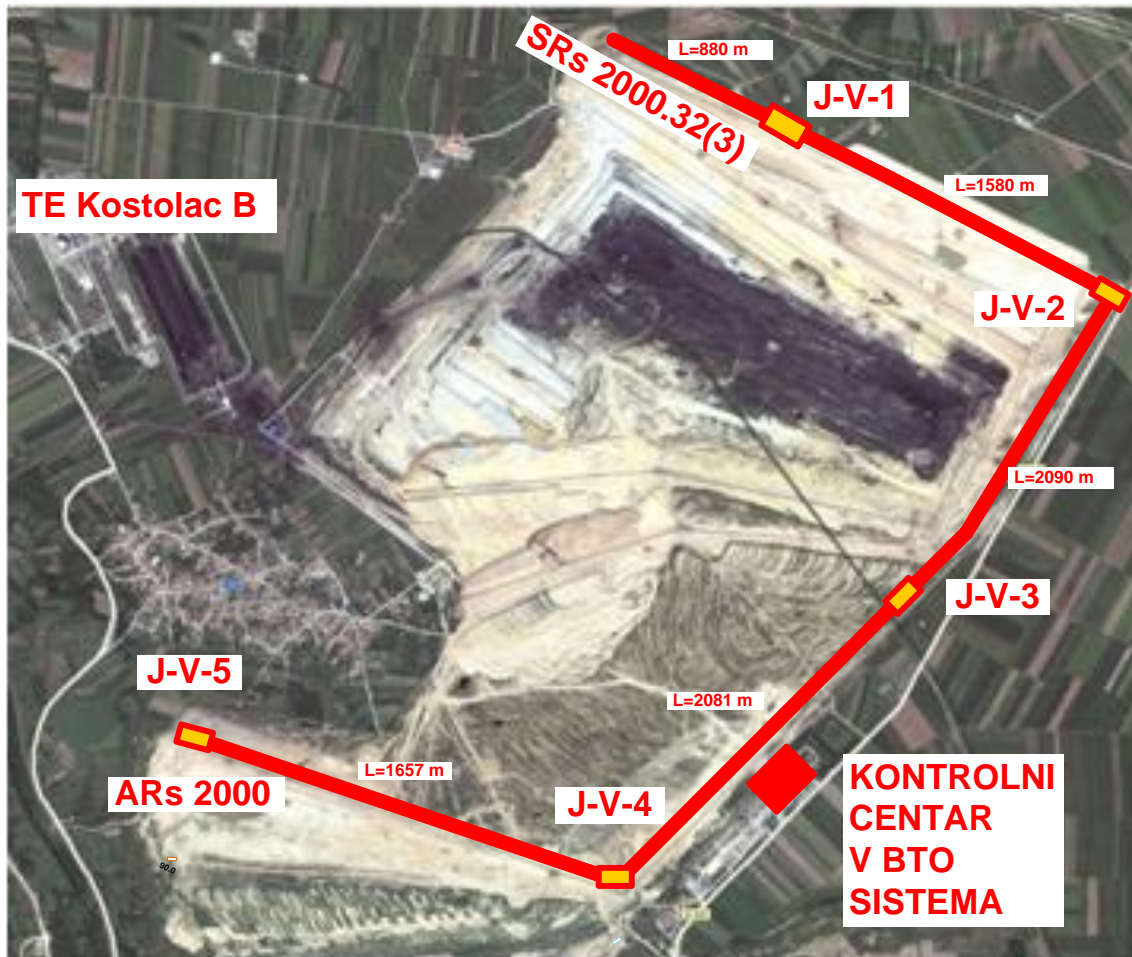
gde se za kopanje koriste bageri sa više radnih elemenata, (ostvaruju neprekidno otkopavanje stenske mase pomoću većeg broja vedrica koje su ravnomerno raspoređene na beskonačnom lancu (vedričar) ili na rotornom točku (rotorni bager)), a za transport iskopanog materijala se isključivo koriste tračni transporteri velikog kapaciteta. Ovaj način kopanja je uobičajen za velike površinske kopove, u kojima se najčešće kopa uglj za potrebe termoelektrana [3].

- Mehanizacija u ovakvim rudnicima je organizovana u sisteme:

1. BTO (bager - tračni transporteri - odlagač) za kopanje otkrivke (jalovine)

2a. BTD (bager - tračni transporteri - drobilana),
2b. BTU (bager - tračni transporteri - utovar) . } za kopanje uglja.

UVOD



Podaci o sistemu tračnih transportera [4]:

Broj tračnih transportera: 5
Ukupna instalisana snaga 20 MW
Trenutna dužina: ~ 8,3 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

Sistem tračnih transportera V BTO sistema na površinskom kopu „Drmno”, Kostolac (rotorni bager, pet tračnih transportera i odlagač) [4]

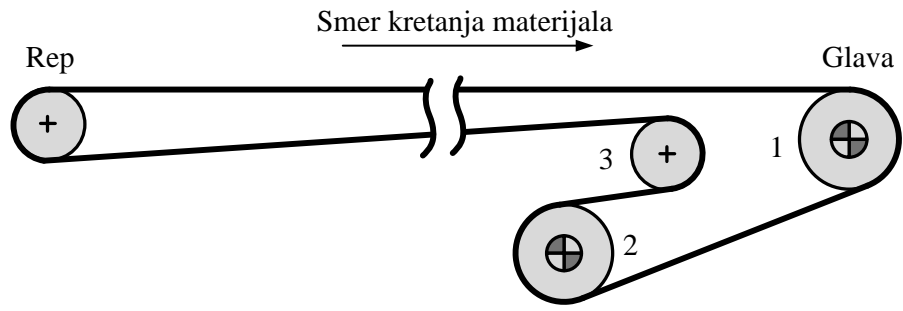
SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- **Pogon transportera sa gumenom trakom**
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

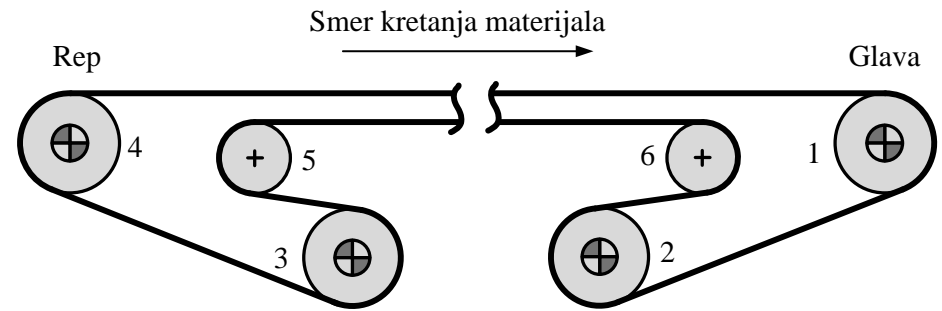
Pogon transportera sa gumenom trakom

- U zavisnosti od funkcije pogona, mehanički elastično povezani pogoni se mogu podeliti na dve osnovne grupe, na pogone čija su **vrtila povezana preko materijala koji je predmet obrade ili je proizvod procesa**, i na pogone čija su **vrtila u stalnoj mehaničkoj vezi, preko elemenata koji su sastavni deo konstrukcije sistema**. U drugu grupu se ubrajaju pogoni tračnih transportera.
- Koriste se za transport rastresitih materijala (uglja, rude i zemlje)
- Na površinskim kopovima koriste se transporteri velikih dužina i kapaciteta

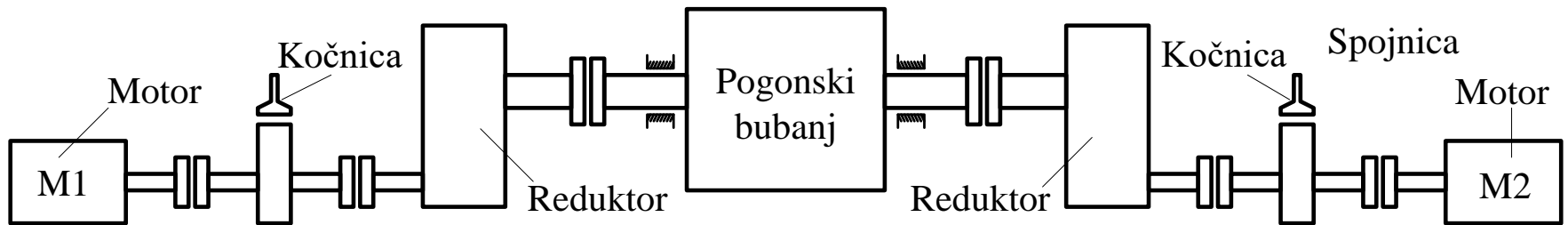
Tračni transporter – osnovni delovi [5]



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

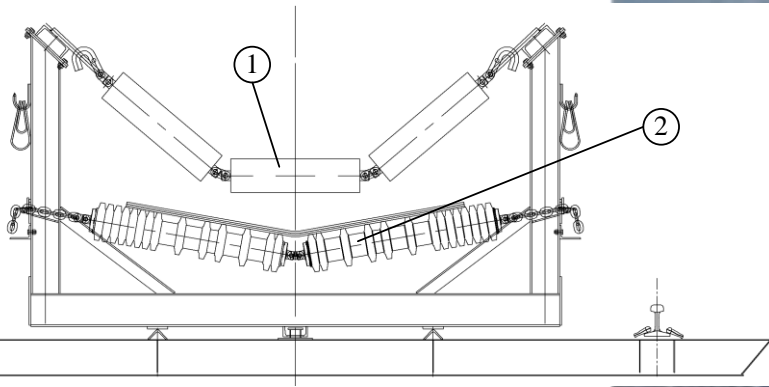


Tračni transporter sa pogonom na oba kraja, 1, 2, 3 i 4 - Pogonski bubnjevi; 5 i 6 - Zatezni bubanj



Pogonski bubanj sa pogonom na obe strane

Tračni transporter – osnovni delovi



Položaj nosećih rolni, 1 - Gornje noseće rolne;
2 - Donje noseće rolne



Tračni transporter:
1 - Pogonska stanica
2 - Trasa trake



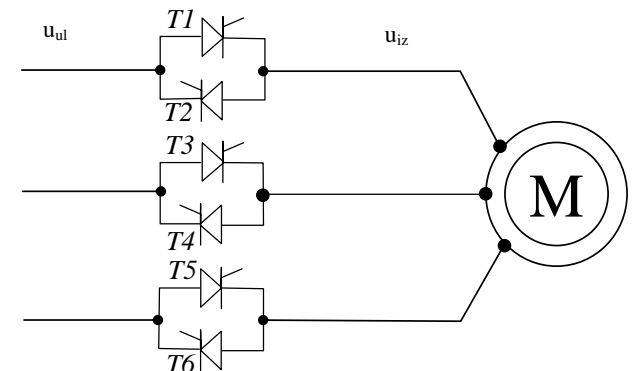
SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- **Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima**
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

Klasični pogoni na tračnim transporterima [5]

- U klasičnim pogonima tračnih transportera primenjuju se :
 1. Kavezni asinhroni elektromotori, sa direktnim uključanjem na napajanje,
 2. Kavezni asinhroni motor, sa prebacačem zvezda – trougao
 3. Soft starteri
 4. Motori sa kliznim prstenovima (namotani rotor) i rotorskim upuštačem, i
 5. Pogoni sa hidrodinamičkim spojnicama
- Za manje tračne transportere sa pogonima do 30 – 45 kW i dalje se u najvećem broju slučajeva primenjuju prve tri varijante pogona.
- Kod savremenih tračnih transportera velikih kapaciteta, dužina i širina trake, koji imaju veliku instalisanu snagu (1MW po motoru), prešlo na upotrebu frekventnih pretvarača.
- Kod klasičnih pogona velikih snaga (ali manjih od 1MW po motoru) i dalje se primenjuje varijante 4 i 5.
- Osnovna razlika: klasični (konvencionalni) pogoni imaju konstantnu brzinu u stacionarnom stanju, dok se kod pogona sa frekventnim pretvaračima ona može menjati

Principijelna šema soft-startera:



Neravnomerna raspodela opterećenja

- Javlja se kod pogona sa više pogonskih bubnjeva zbog različitih prečnika bubnjeva (posledica habanja, prljavštine...)
- 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 - posledica neravnomerna raspodela momenata [5].
- Kod pogona sa hidrauličkim spojnicama problem se rešava različitom količinom punjenja spojnicu uljem na pogonima.

Upravljanje pogonom tračnog transportera

- Kod pogona sa frekventnim pretvaračima ne postoji problem neravnomerne raspodele opterećenja, jer se jednostavnom korekcijom učestanosti mogu uskladiti brzine motora, kako bi se dobila jednaka raspodela opterećenja. Promena brzine, odnosno učestanosti obezbeđuje se kroz upravljački sistem.
- Klasični pogoni za transportere ne raspolažu mogućnošću podešavanja brzine
- Savremeni pogon tračnog transportera se realizuje **kao višemotorni regulisani pogoni**, koji obezbeđuju kontrolu brzine sistema, i ravnomernu raspodelu opterećenja između pogona.
- Koriste dve osnovne upravljačke strukture [6]:
 1. „master-slave“ i
 2. sa regulatorom srednje brzine pogona realizovanim u nadređenom upravljačkom sistemu

Upravljanje - „master-slave“ (master -follower)

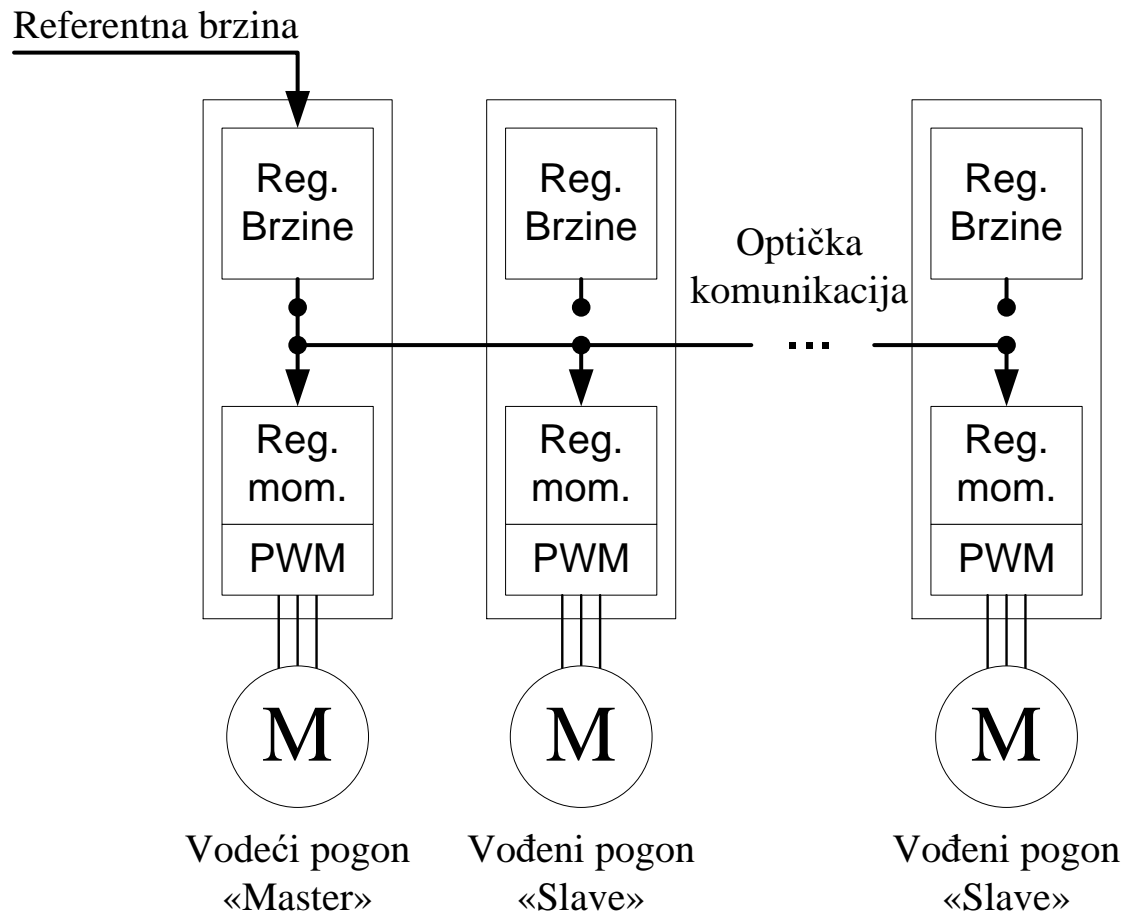
- Upravljačka struktura „master-slave“ ima sledeće odlike:

- 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 pretvarača, 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, kao npr. kompenzacija proklizavanja i sl.

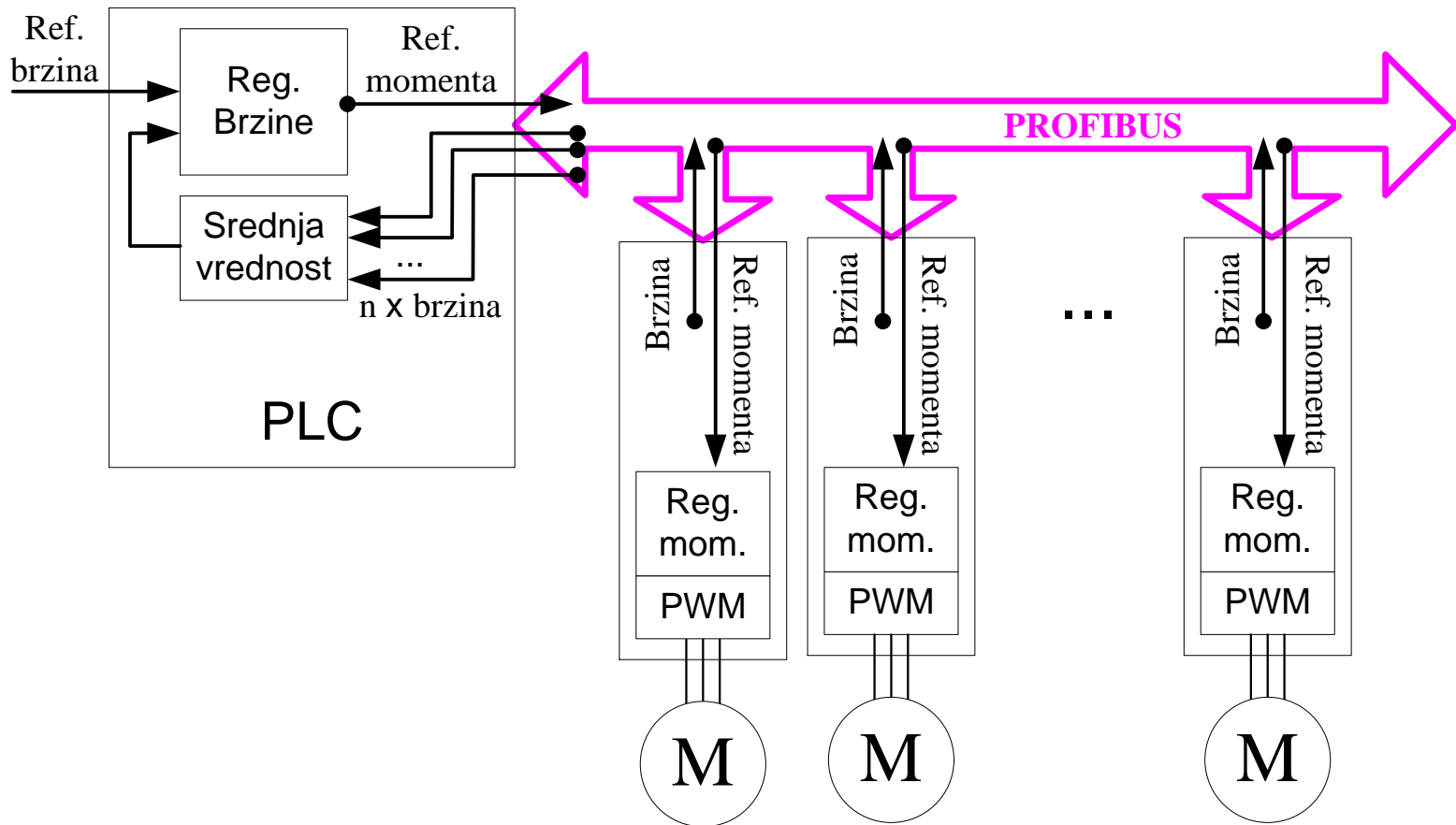
Upravljanje - „master-slave“



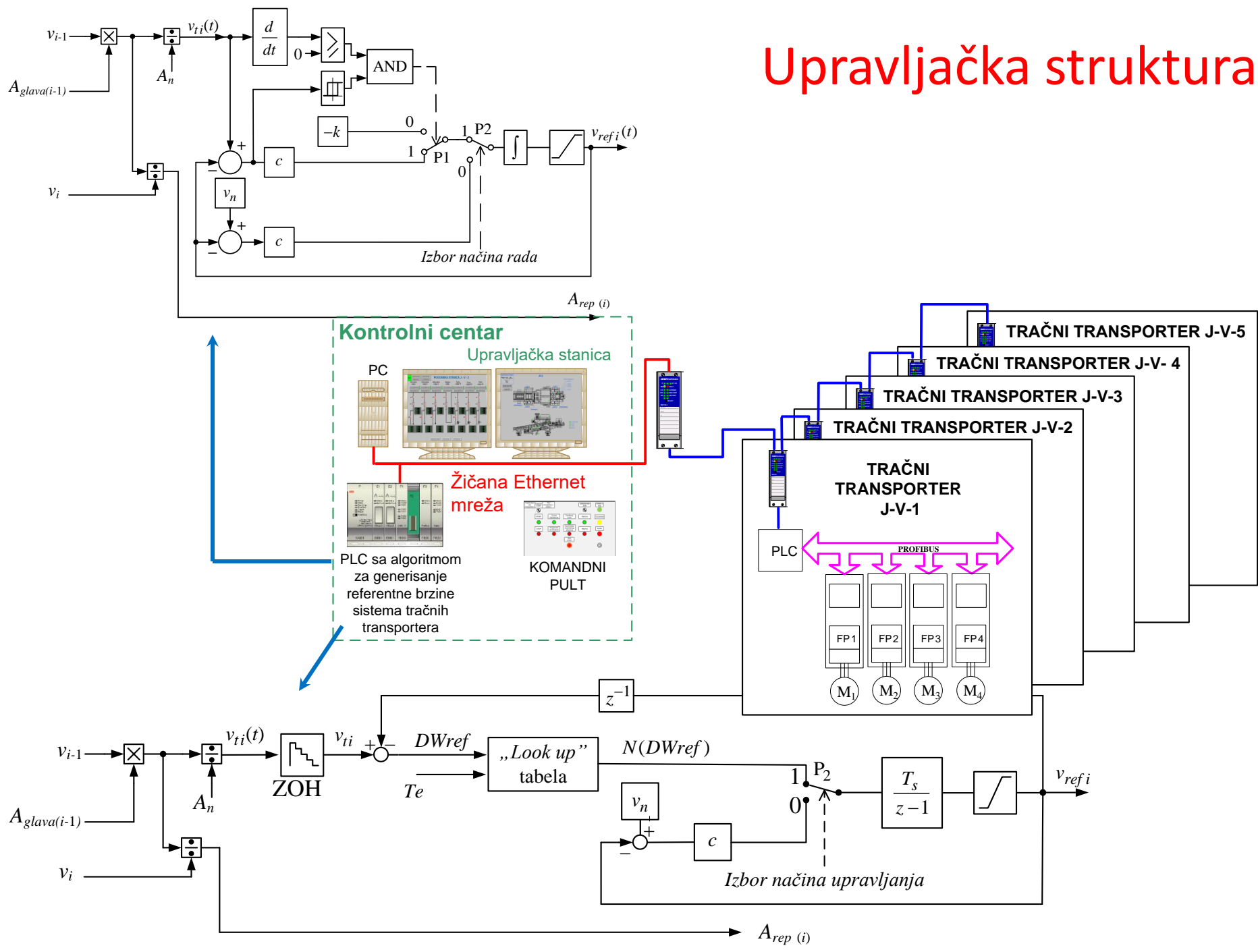
Upravljačka struktura sa regulatorom srednje brzine

- Odlike upravljačke strukture sa regulatorom srednje brzine u PLC-u su [6]:
- 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 transportera.
 - Nedostatak rešenja upravljanja sa regulatorom srednje brzine je neophodnost korišćenja programabilnog kontrolera (PLC-a) visokih performansi.

Upravljačka struktura sa regulatorom srednje brzine



Upravljačka struktura



Ostale prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima

➤ Pored navedene regulacije brzine sa ravnomernom raspodelom opterećenja, treba navesti i ostale prednosti, kao i mogućnosti upravljačkog sistema [6]:

a) brzina kretanja trake:

- Konvencionalni pogoni - konstantna brzina u stacionarnom režimu rada, pogoni sa frekventnom regulacijom - omogućena promena brzine.
- Tehnološki zahtev za promenom brzine rešavan primenom relativno složenih sistema (konvencionalni pogoni). Jednostavna regulacija sa dodatnom mogućnošću povećanja energetske efikasnosti (pogoni sa frekventnom regulacijom)

b) dužina tračnog transportera:

Veća dužina pojedinačnih tračnih transportera za istu instalisanu snagu u slučaju pogona sa frekventnom regulacijom .

c) Pokretanje tračnih transportera: - veoma izražena naprezanja svih elemenata, koja se još više uvećavaju sa porastom kapaciteta i dužine (velike inercione mase).

- Elektromehanički sistemi pokretanja - elektromotor i mehanička naprava (mehanički varijator brzine, hidrodinamička spojnica, elektromagnetna spojnica).

Brzina obrtanja motora može biti bitno različita od brzine pogonskog vratila.

Podešavanje brzine, momenta, kontrola ubrzanja i usporenja ostvaruje se mehaničkim putem dok se motor uvek okreće istom brzinom.

- Električni sistemi pokretanja - motor sa potrebnom elektro opremom za napajanje, uključenje i upravljanje motorom. Mehanički spoj sa reduktorom - kruta spojnica, ili spojnice sa sasvim malim stepenom elastičnosti. Brzina obrtanja motora uvek jednaka sa brzinom pogonskog vratila i prilagođava se potrebama postrojenja.

d) Kočenje tračnih transportera:

- Mehaničko kočenje
- Električno kočenje samo kod pogona sa frekventnim pretvaračima (i neke skupe varijante soft-startera).
 - dinamičko kočenje – čoper i otpornici za kočenje
 - rekuperacija – reverzibilni ispravljač u okviru frekventnog pretvarača

f) Mogućnost proklizavanja: Kod transportera sa trakama vučna sila sa pogonskih bubnjeva se na traku prenosi na principu adhezije, koja mora da bude veća od vučne sile, u protivnom traka proklizava (brzina trake je manja od obimne brzine bubnja).

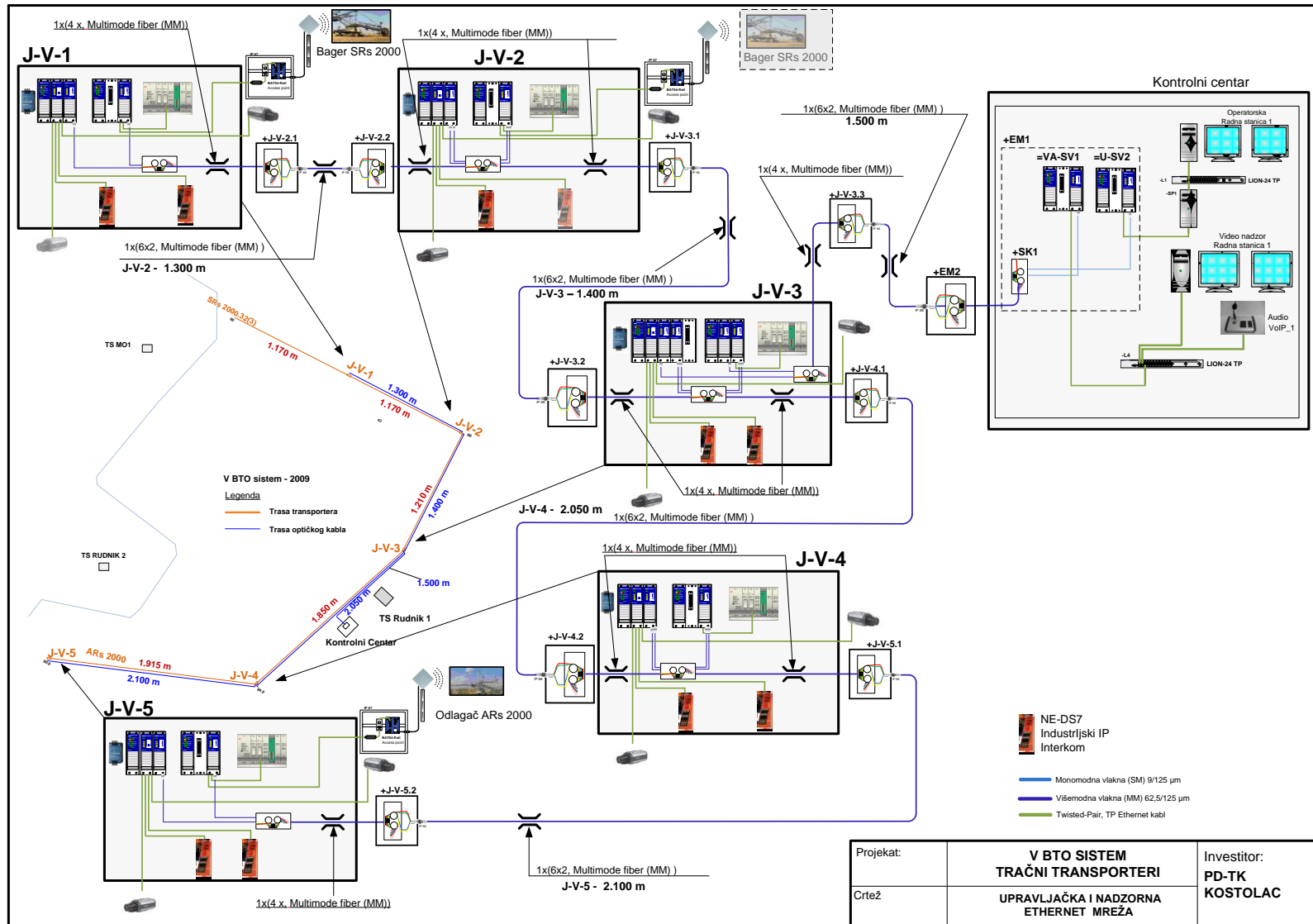
-Posledice – zatrpavanje presipnih mesta, zakošenja trake, paljenje trake...

- Sistemi za detekciju proklizavanja (samo kod pogona sa frekventnim pretvaračima) - rade na principu upoređenja brzine pogonskih sa brzinom jednog pasivnog bubnja.

- Klasična rešenja pogona, kao i sa soft-starterima, ne obezbeđuju mogućnost direktne kontrole vučne sile, odnosno momenta motora, i kod njih nije moguće primeniti opisanu metodu kontrole proklizavanja.

g) Dimenzionisanje elemenata transportera: U poređenju sa klasičnim transporterima, transporteri sa pogonima sa frekventnim pretvaračima se mogu dimenzionisati na manju prekidnu čvrstoću trake, manje pogonske reduktore, manje bubnjeve, a samim tim i noseću konstrukciju.

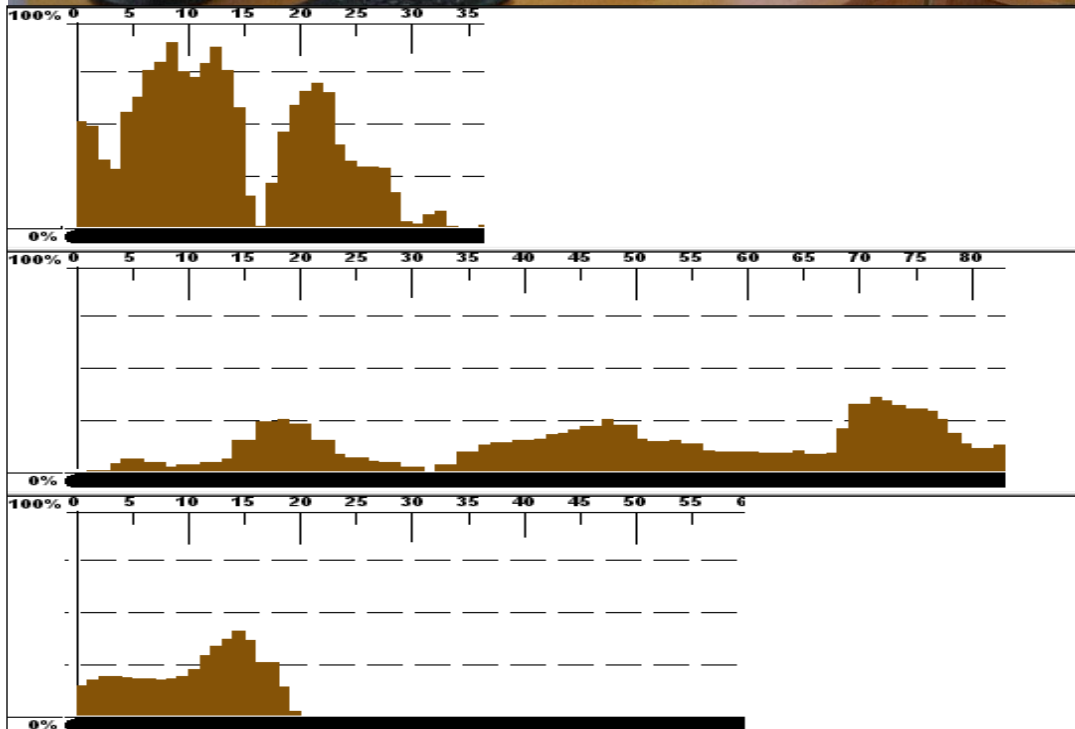
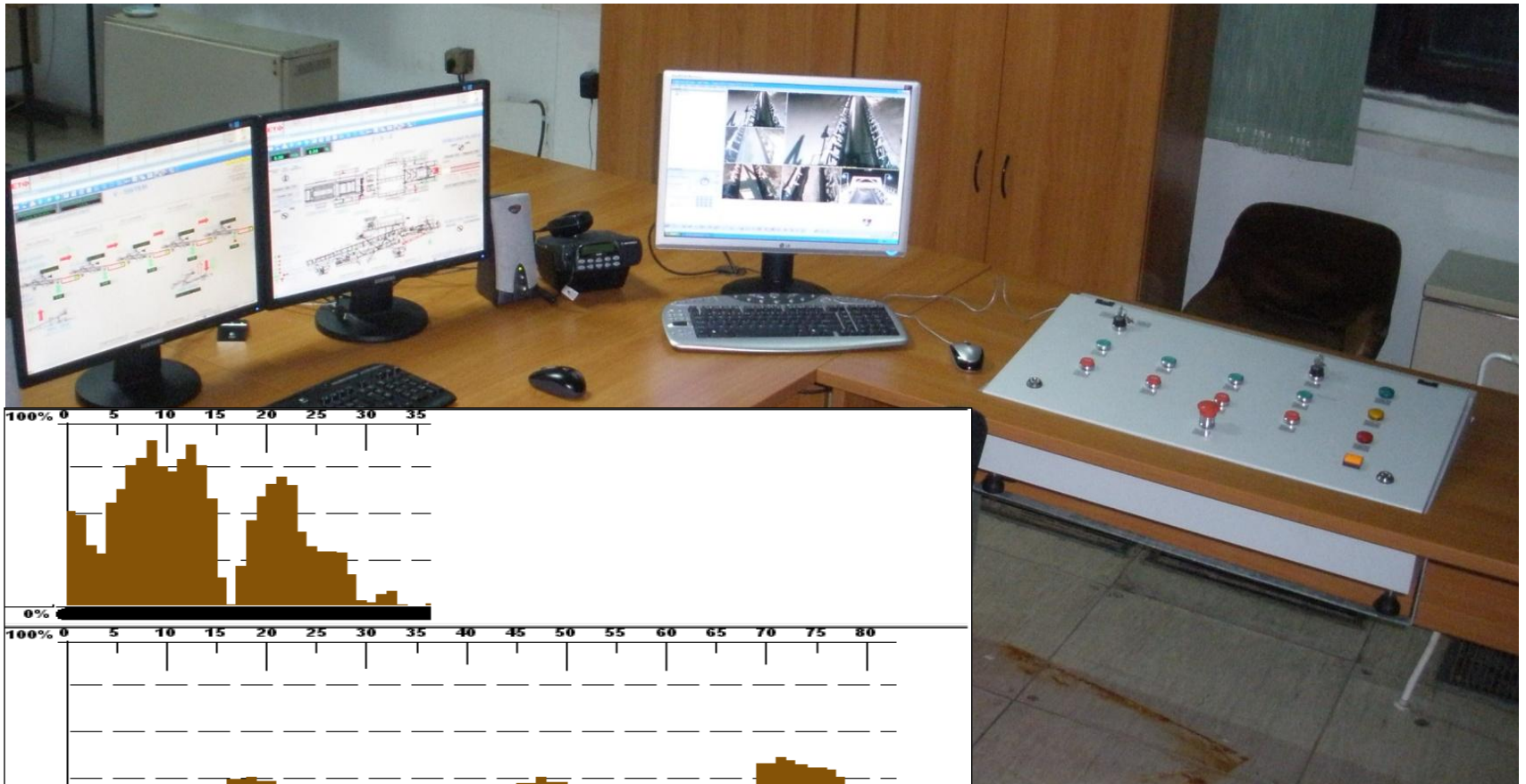
Upravljačka i nadzorna mreža V BTO sistema [4]



Daljinski nadzor i upravljanje

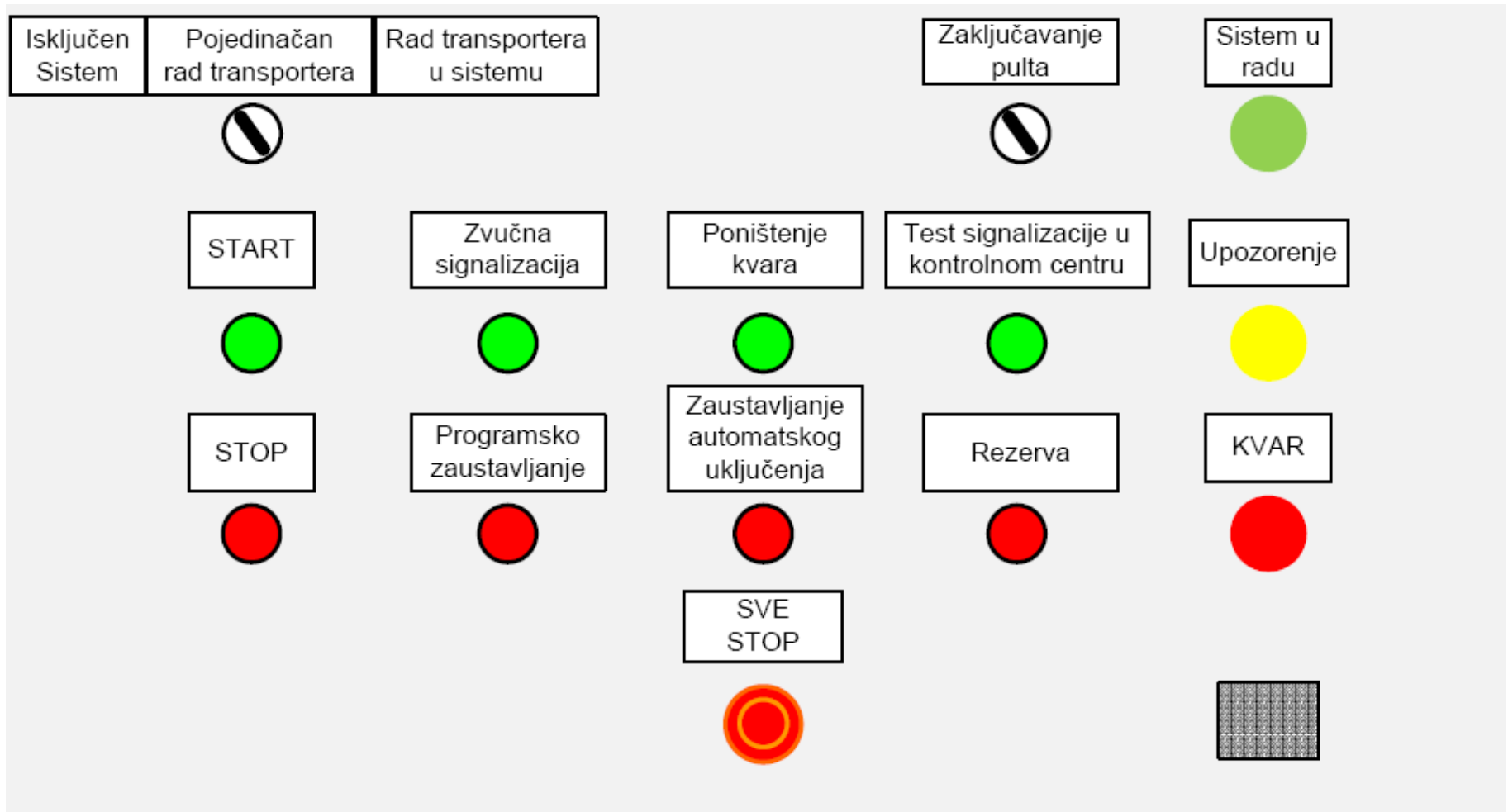
- Hardverske komande u Centru.
- Aplikativni softver razvijen na DigiVis-u:
 - ✓ Grafički prikaz.
 - ✓ Sistem više ekrana.
 - ✓ Interaktivan rad.
 - ✓ Prikaz stanja.
 - ✓ Upozorenja i poruke.
 - ✓ Trendovi – snimanje karakterističnih veličina u vremenu.
 - ✓ Sumiranje rezultata proizvodnje.

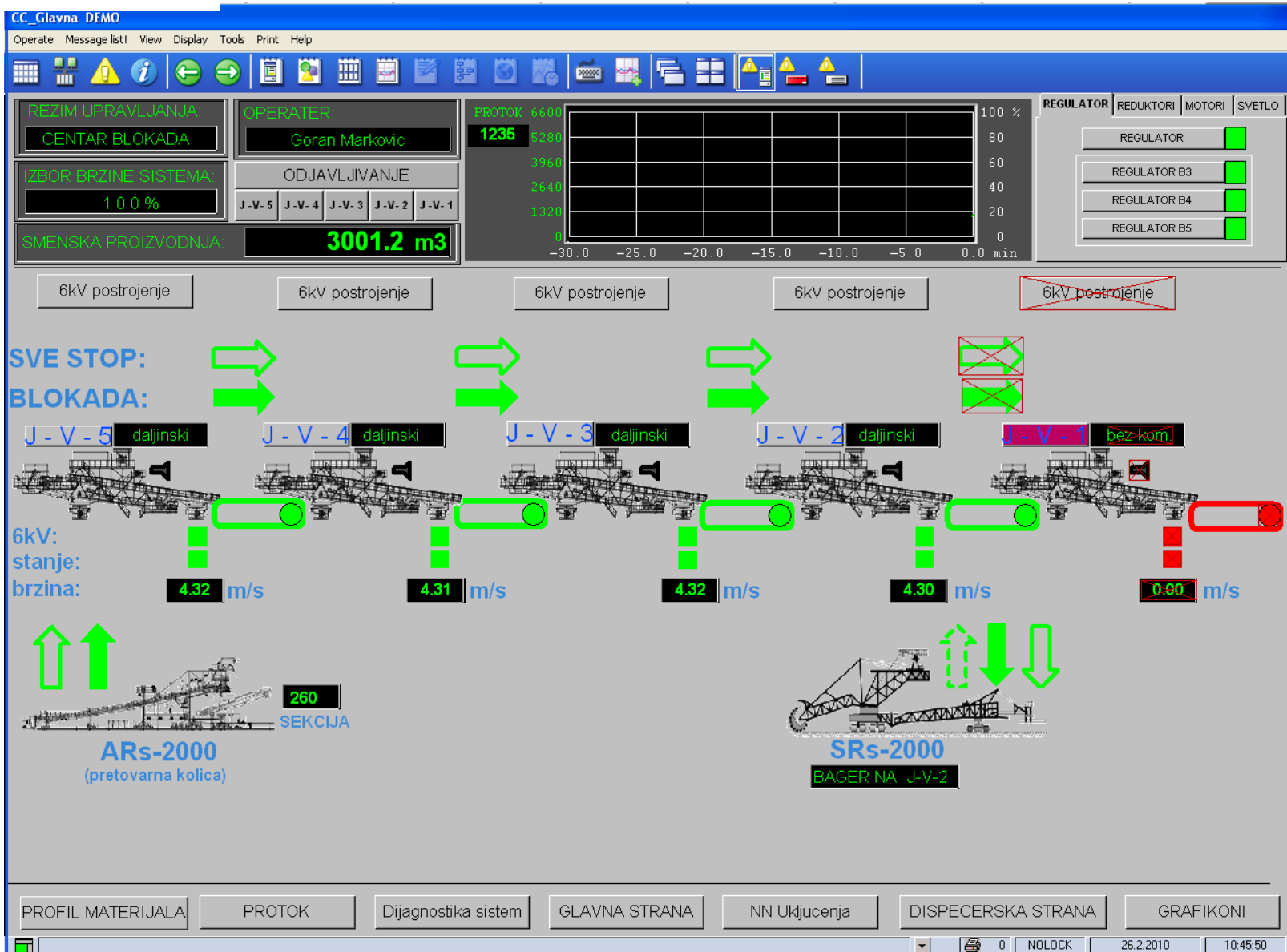
Kontrolni centar V BTO sistema [4]



Grafički prikaz kretanja materijala na traci

Hardverske komande u Centru [4]





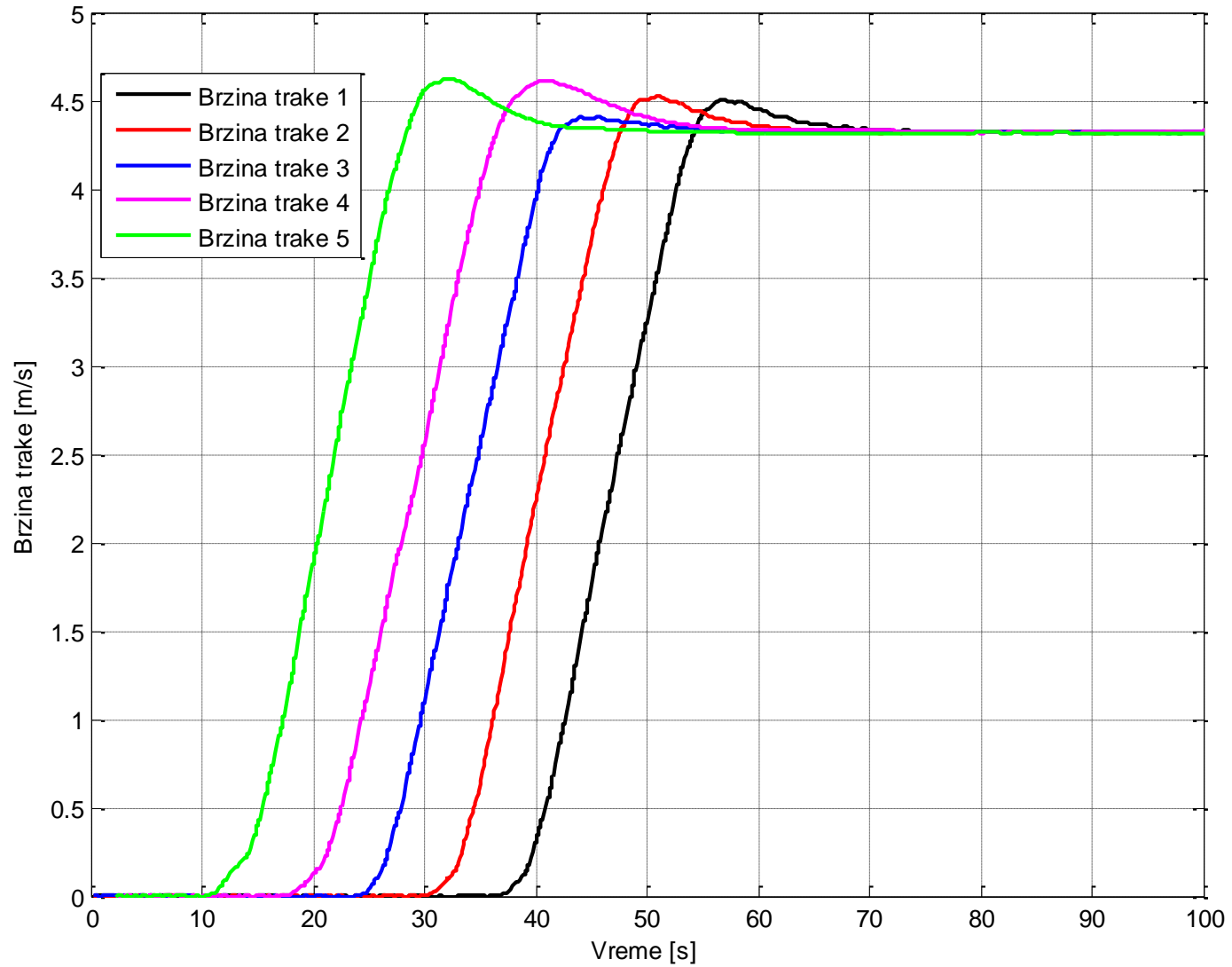
Video nadzor [4]



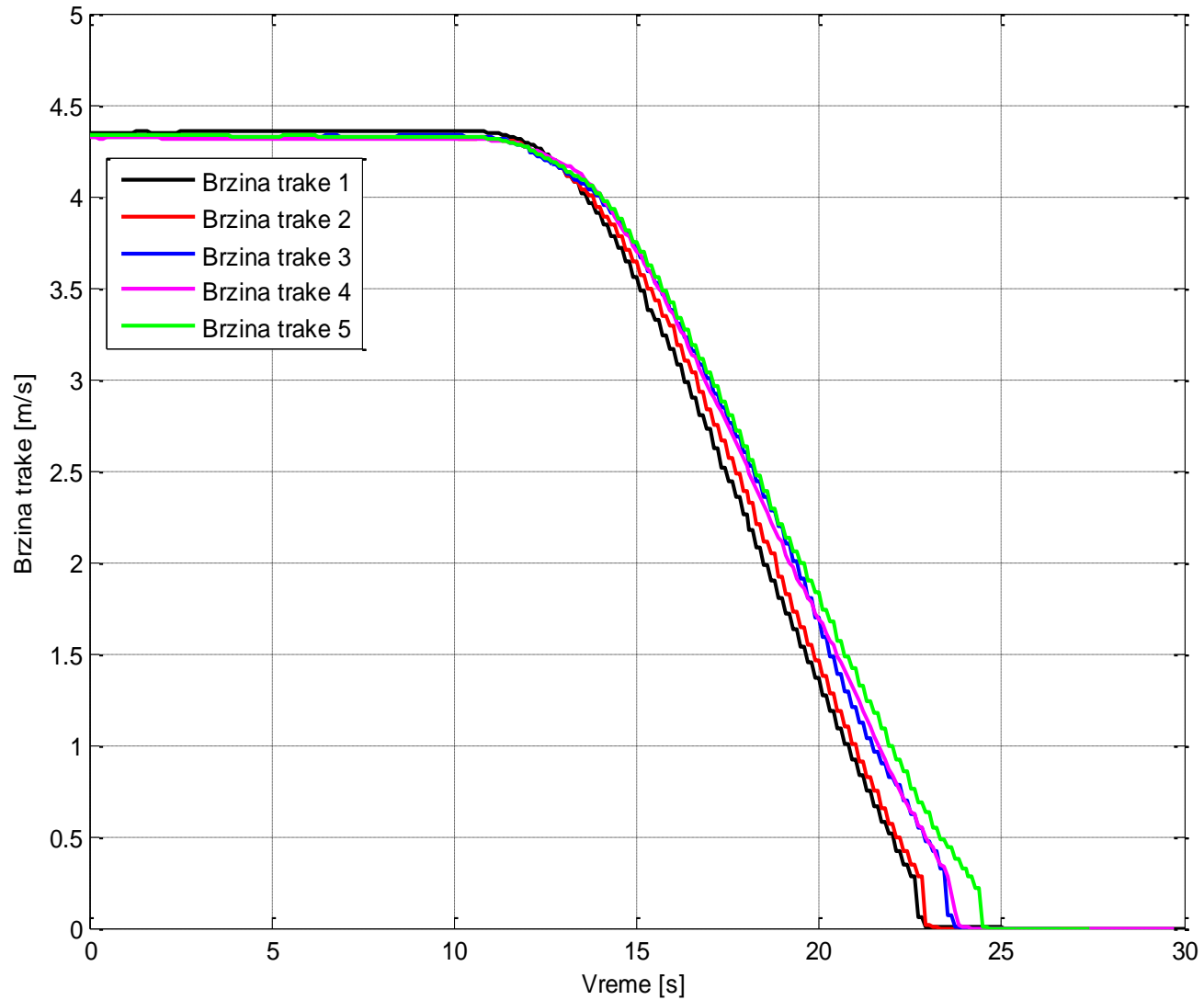
Povećanje vremenskog iskorišćenja

- Skraćenje vremena manipulacije.
 - Smena posade.
 - Spremanje sistema za rad.
 - Vreme puštanja u rad.
- Dijagnostika.
 - Pregled smetnji i kvarova od strane operatera.
 - Pregled stanje sa Inženjerske stanice.
- Intervencija preko VPN-a.

Puštanje sistema u rad [4]



Zaustavljanje sistema [4]



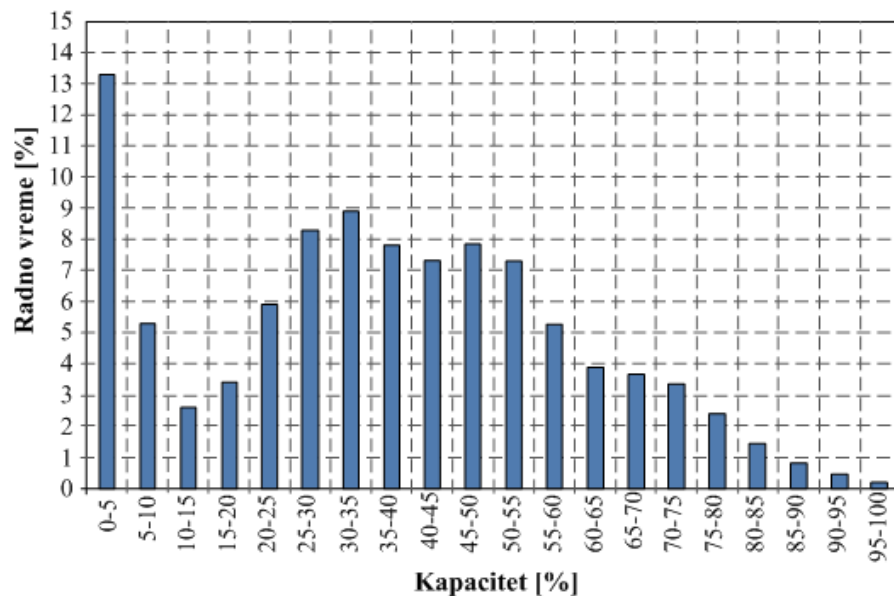
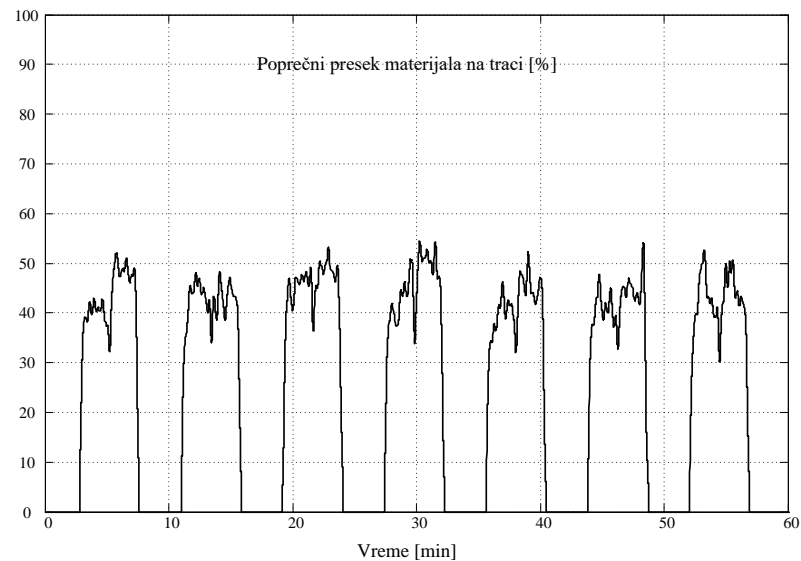
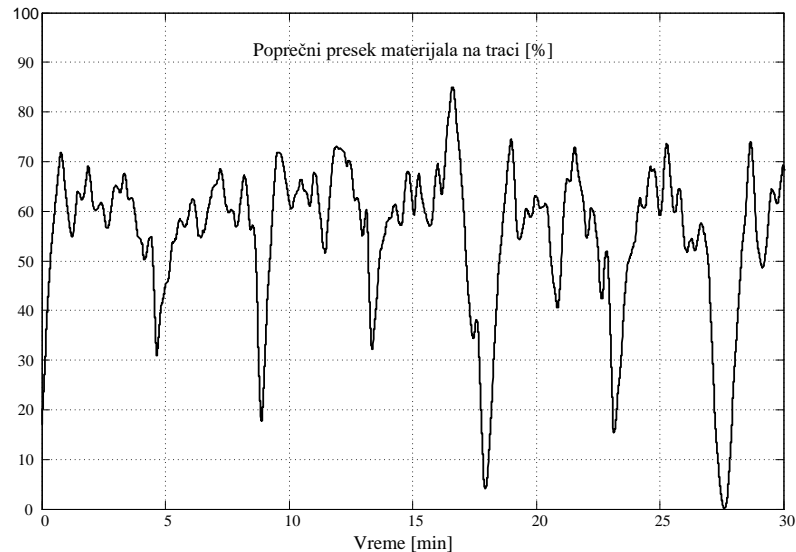
SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- **Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom**
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

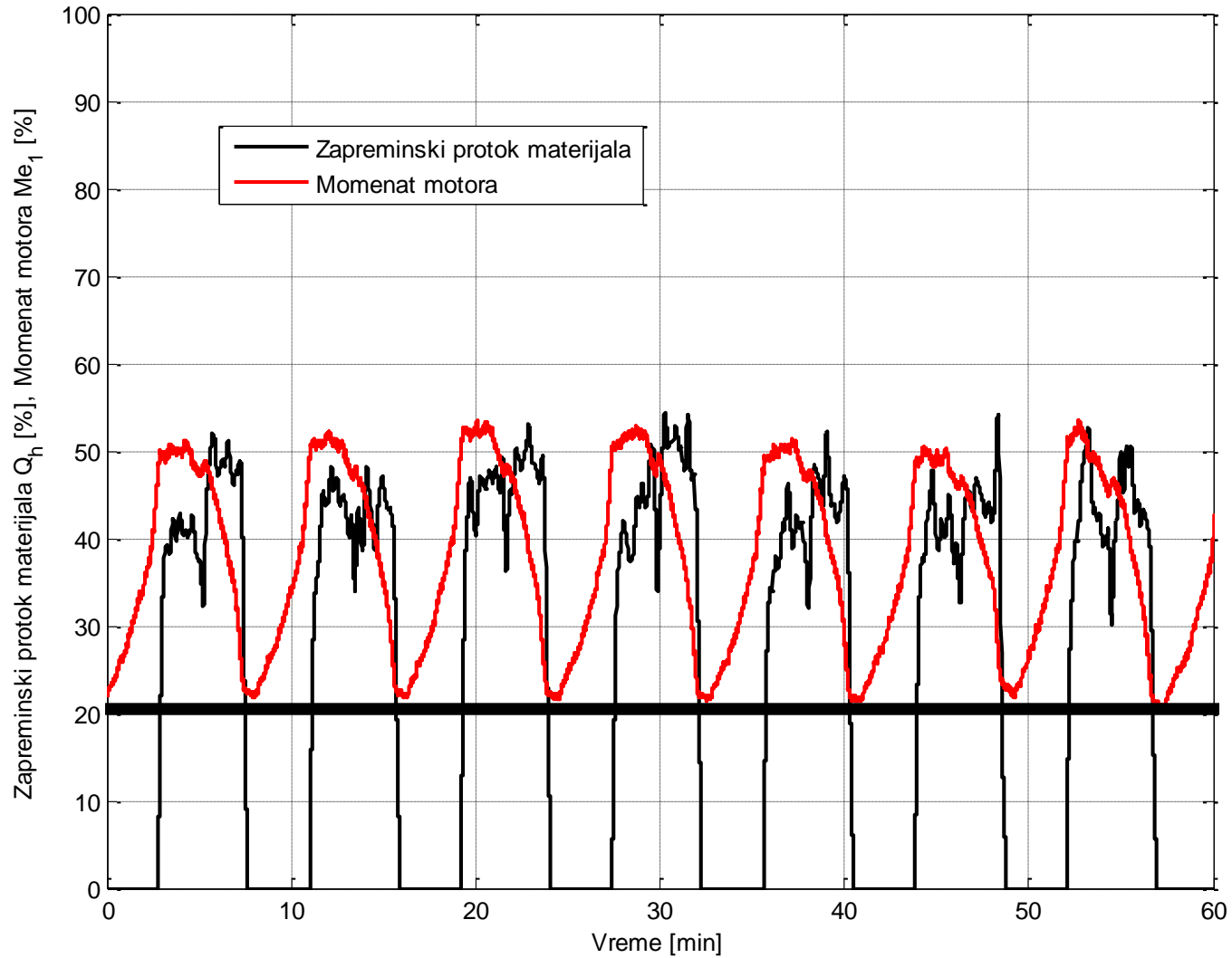
Povećanje energetske efikasnosti tračnih transportera [1]

- Optimizacija procesa: poboljšanja energetske efikasnosti na četiri nivoa: na nivou performansi, rada, opreme i tehnologije:
 - **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 savremenosti 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.

Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom [5]

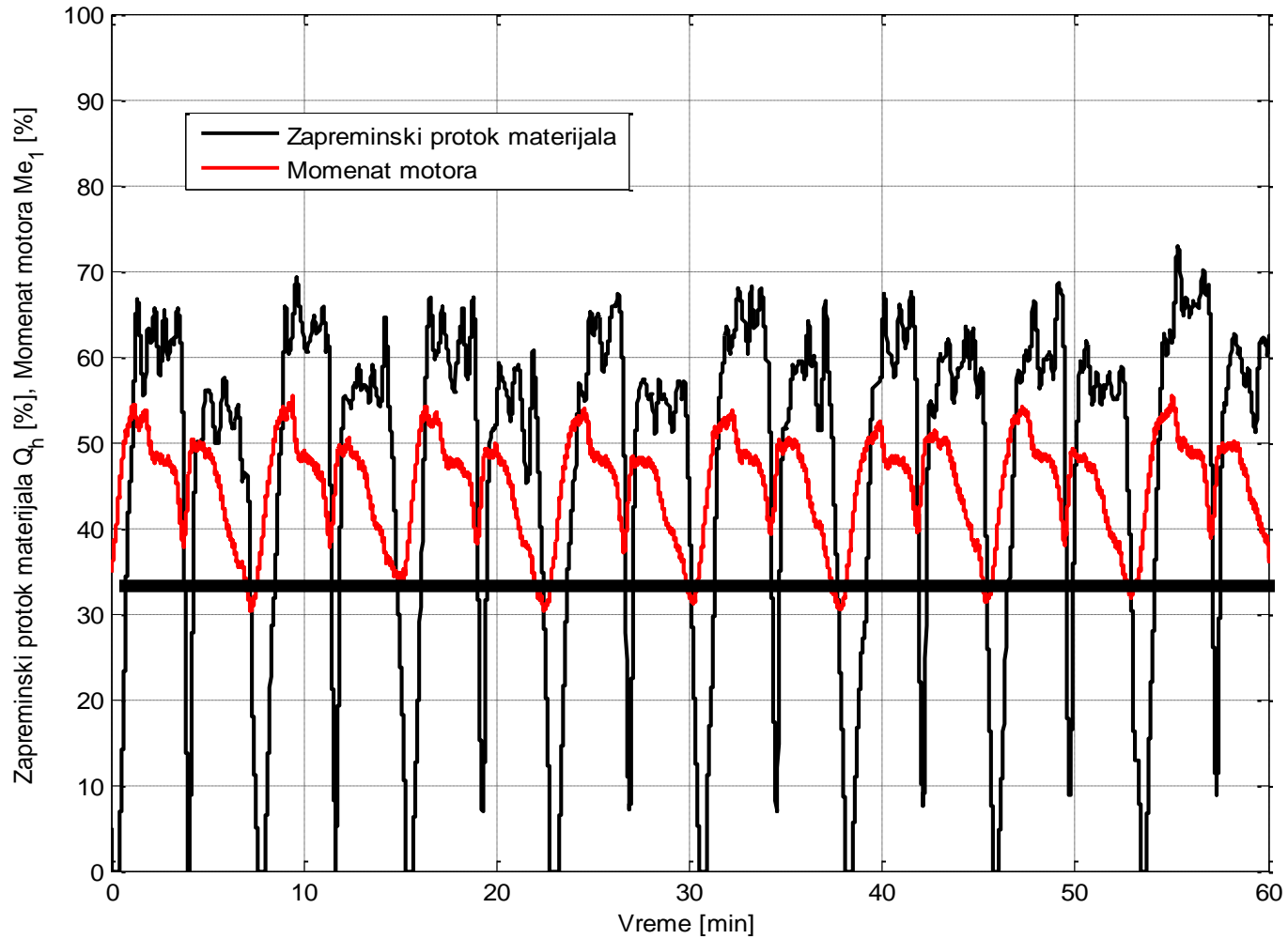


Profil materijala na traci [4]



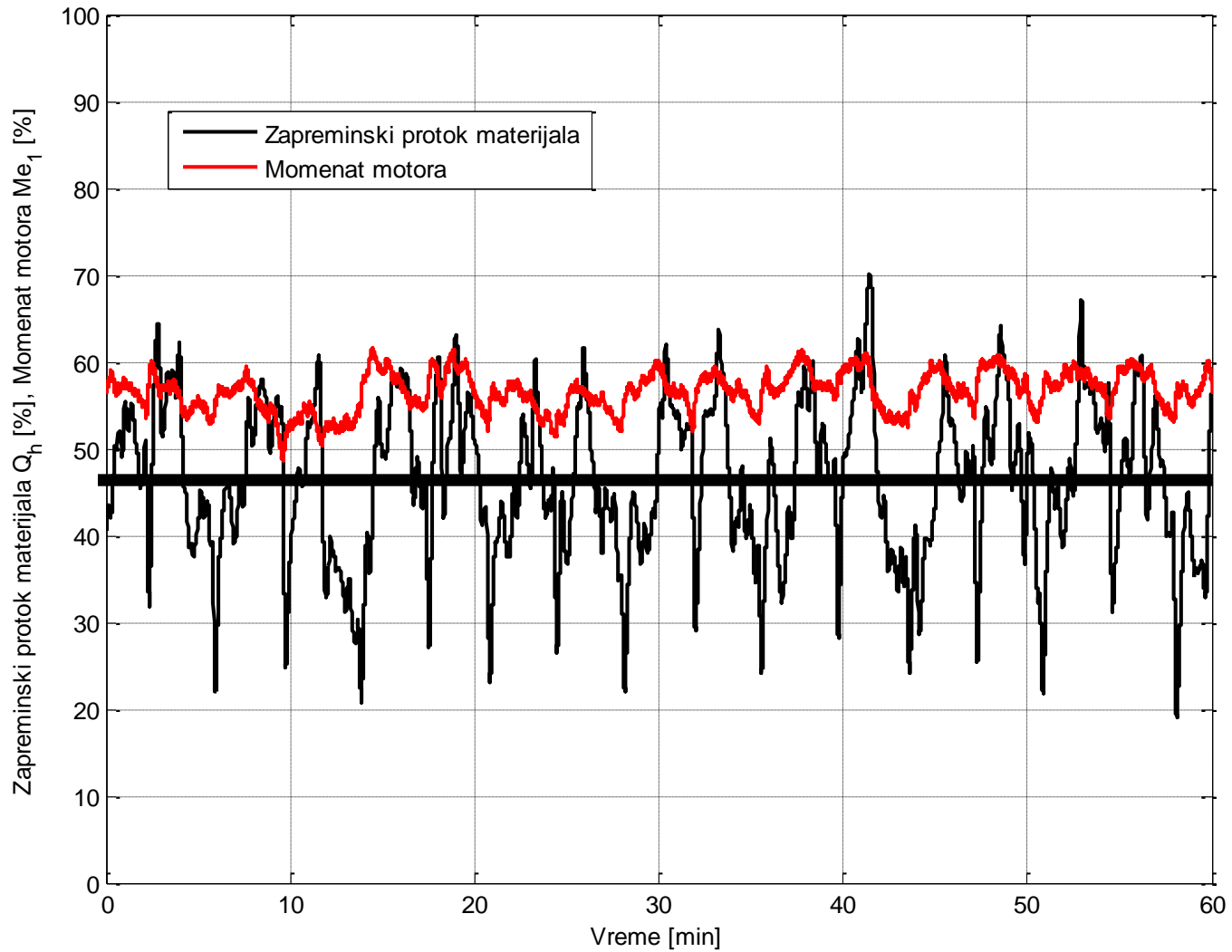
20%

Profil materijala na traci [4]



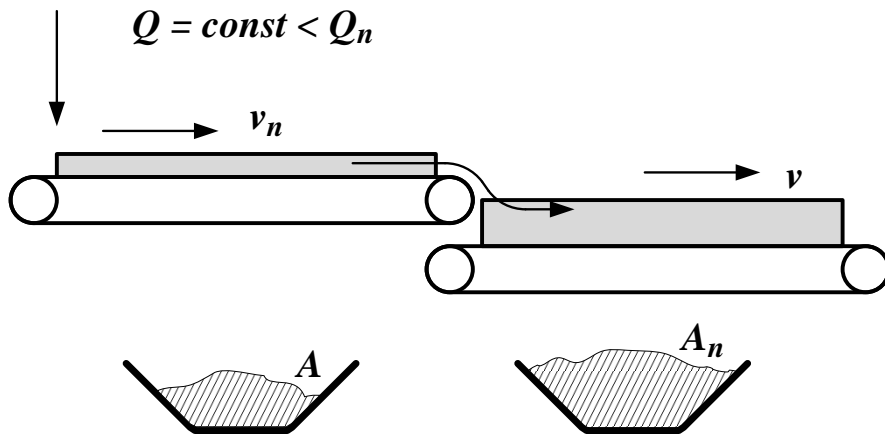
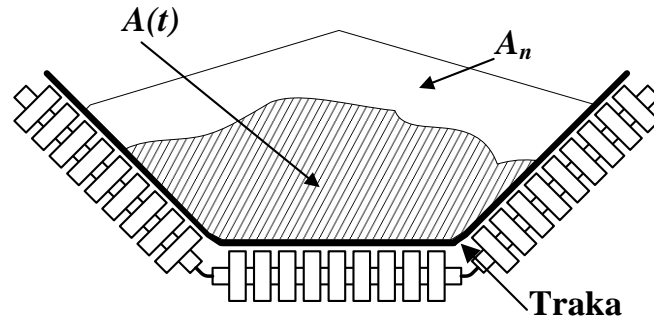
35%

Profil materijala na traci [4]



47%

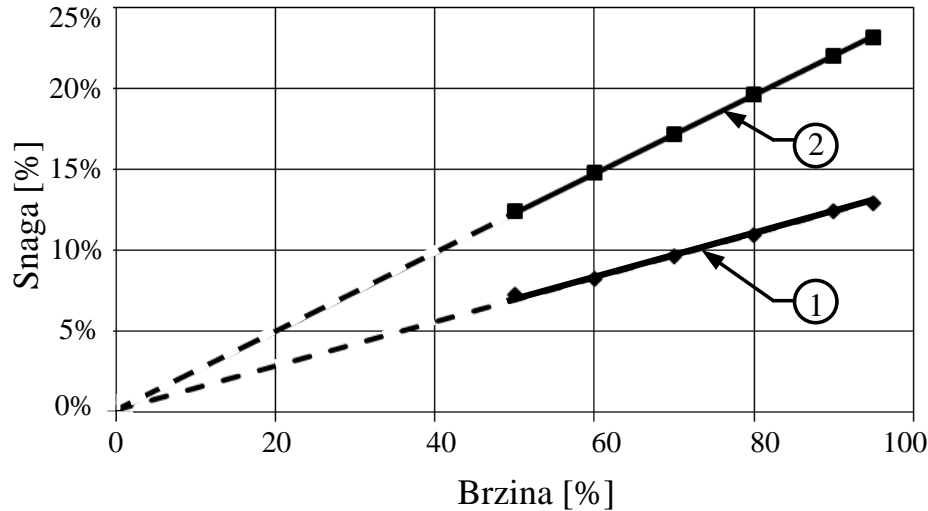
Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom



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

$$A(t) < A_n \Rightarrow v(t) < v_n \quad (2)$$

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



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

$$v(t) = \frac{A(t)}{A_n} v_n \quad (3)$$

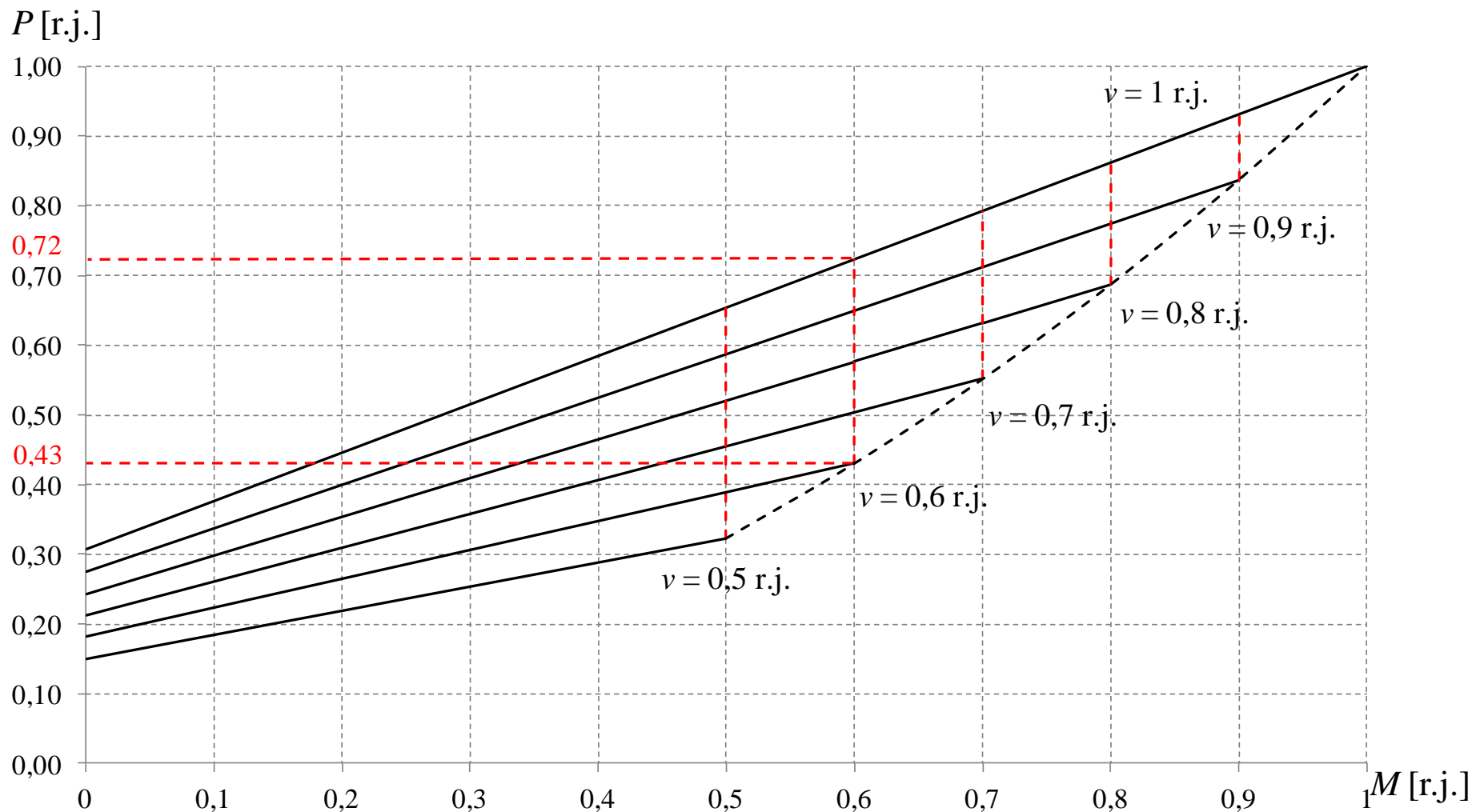
$$F(v) = M \cdot g \cdot f(v) \quad (4)$$

$$P_{ph}(v) = M_b \cdot g \cdot f(v) \cdot v \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 P &= (M_{bm} + M_b) \cdot g \cdot f \cdot v = (A \cdot L \cdot \gamma + M_b) \cdot g \cdot f \cdot v \\
 &= \underbrace{(A \cdot v)}_{const} \cdot L \cdot \gamma \cdot g \cdot f + M_b \cdot g \cdot f \cdot v
 \end{aligned} \quad (6)$$

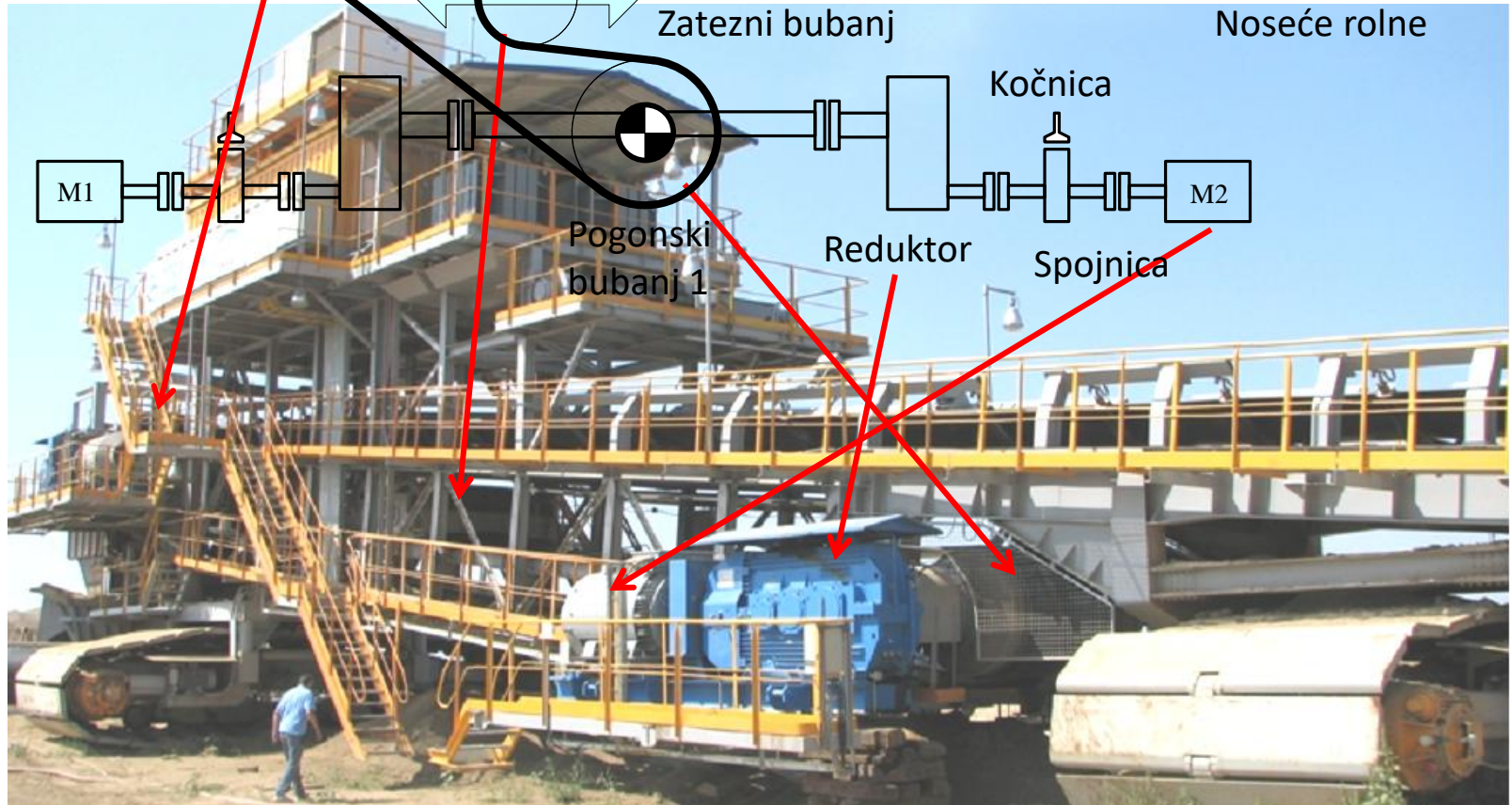
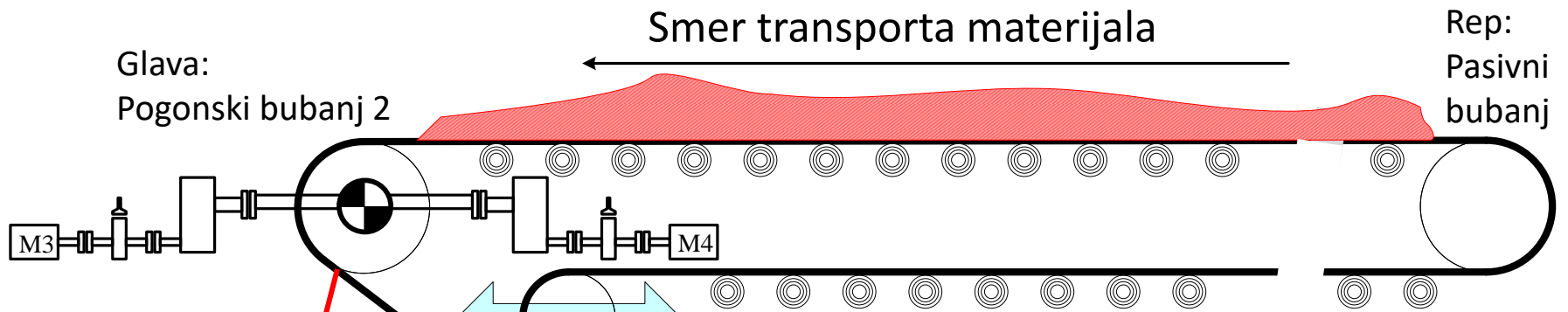
Podešavanjem brzine prema (3) za transport određene količine materijala ostvariće se ušteda energije, na osnovu smanjenja snage potrebne za kretanje trake!!!

Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom [1]



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

Tračni transporter kao deo jalovinskog sistema [4]



Osnovi proračuna snage pogona tračnih transportera [1]

Za proračun otpora kretanja i potrebne snage pogona tračnog transportera koriste se standardi : DIN 221, ISO 5048, CEMA, JIS B 8805, AS 1333-1994...

DIN 22101 - podela u četiri grupe otpora:

$$F_W = F_H + F_N + F_{St} + F_S$$

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.

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

μ - fiktivni koeficijent trenja

L - dužina između repa i glave tračnog transportera

g - gravitaciono ubrzanje

M'_{RD} - podužna masa rolni na povratnoj strani trake

M'_{RU} - podužna masa rolni na nosećoj strani trake

Otpori kretanja trake

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

μ - fiktivni koeficijent trenja

L - dužina između repa i glave tračnog transportera

g - gravitaciono ubrzanje

M'_{RU} - podužna masa rolni na nosećoj strani trake

M'_{RD} - podužna masa rolni na povratnoj strani trake

M'_L - podužna masa materijala na celoj dužini tračnog transportera

M'_G - podužna masa trake

δ - ugao nagiba trase tračnog transportera u odnosu na horizontalnu ravan

$$F_N = (C - 1) \cdot F_H$$

C - korekcionni koeficijent koji zavisi od ukupne dužine tračnog transportera

$$F_{St} = H \cdot g \cdot (M'_G + M'_L)$$

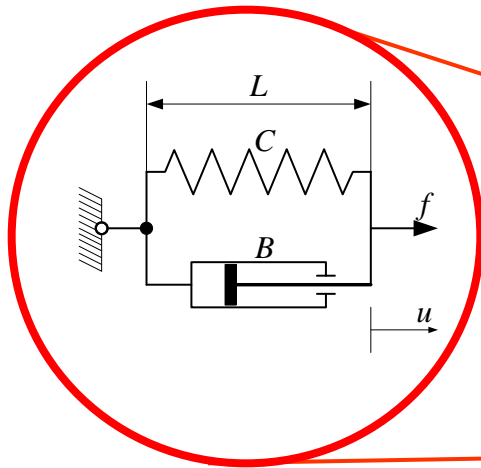
H - visinska razlika između krajnjih tačaka tračnog transportera.

SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- **Dinamički model tračnog transportera**
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

Dinamički model trake

Kelvin-Voigt-ov element



$$f = f_c = C \cdot u + B \cdot \frac{du}{dt}$$

$$C = \frac{E \cdot A}{L}$$

$$B = \frac{\eta \cdot A}{L}$$

E – Young-ov modul elastičnosti materijala

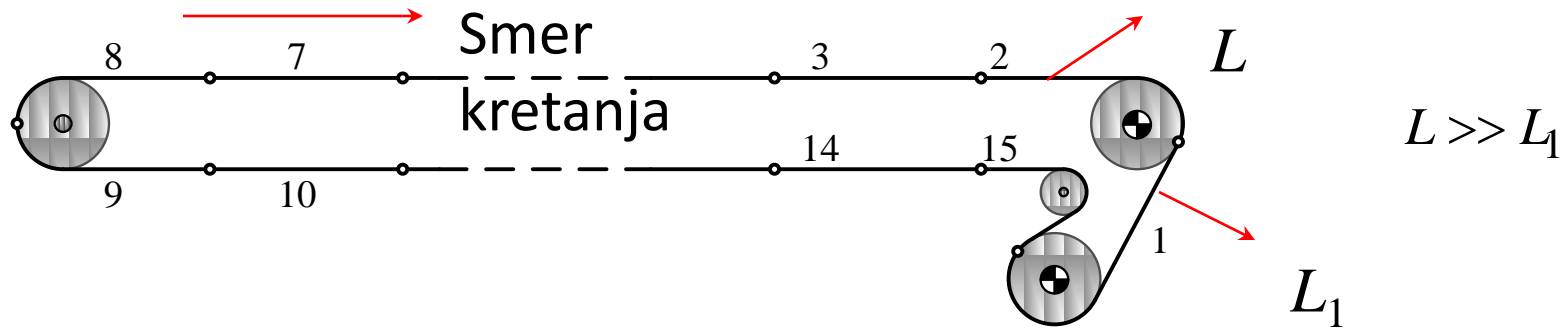
η - koeficijent viskoznosti materijala

u – promena dužine elementa

A – površina preseka elementa



Dinamički model trake – pogonski segmenti



Opšti model prvog
pogonskog segmenta

$$M_{T1} \frac{dv_1}{dt} = f_{e1} - f_{c1} + f_{c15} - f_{m1}$$

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

$$\frac{d\Delta u_1}{dt} = v_1 - v_2$$

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

$$f_{e1} = I \cdot \frac{2}{D} \cdot m_{e1}$$

Opšti model drugog
pogonskog segmenta

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

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

$$\frac{d\Delta u_2}{dt} = v_2 - v_3$$

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

$$f_{e2} = I \cdot \frac{2}{D} \cdot m_{e2}$$

Dinamički model trake – nepogonski segmenti

Opšti model i -tog $i \in [3, \dots, 8]$
nepogonskog segmenta na
gornjoj strani trake:

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

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

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

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

Opšti model i -tog $i \in [9, \dots, 15]$
nepogonskog segmenta na
donjoj strani trake:

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

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

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

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

Dinamički model trake – raspodela mase na segmentima trake

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} = A(t) \cdot v(t) = A(t) \cdot v_{const} \approx A(t)$$

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

$$R = \frac{L}{L_{ps}} \in \mathbb{N} \quad trigger = \begin{cases} 0 & \int v dt < L_{ps} \\ 1 & \int v dt = L_{ps} \end{cases}$$

$t_o = t$ akko $trigger = 1$

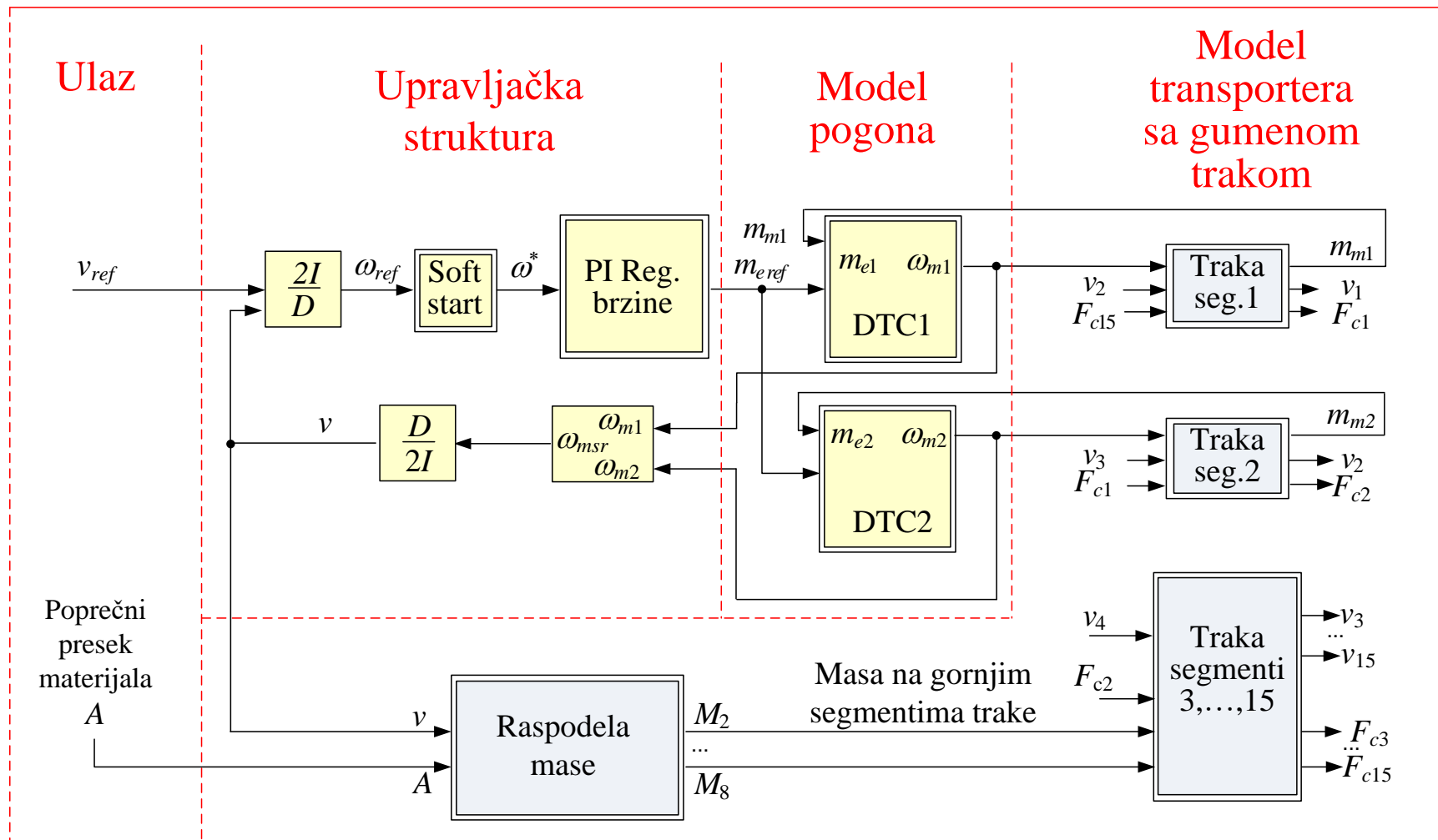
$$A_{iul} = \frac{Q(t_o)}{v(t_o)}$$

$$A_{(i-1)ul} = A_{iz}$$

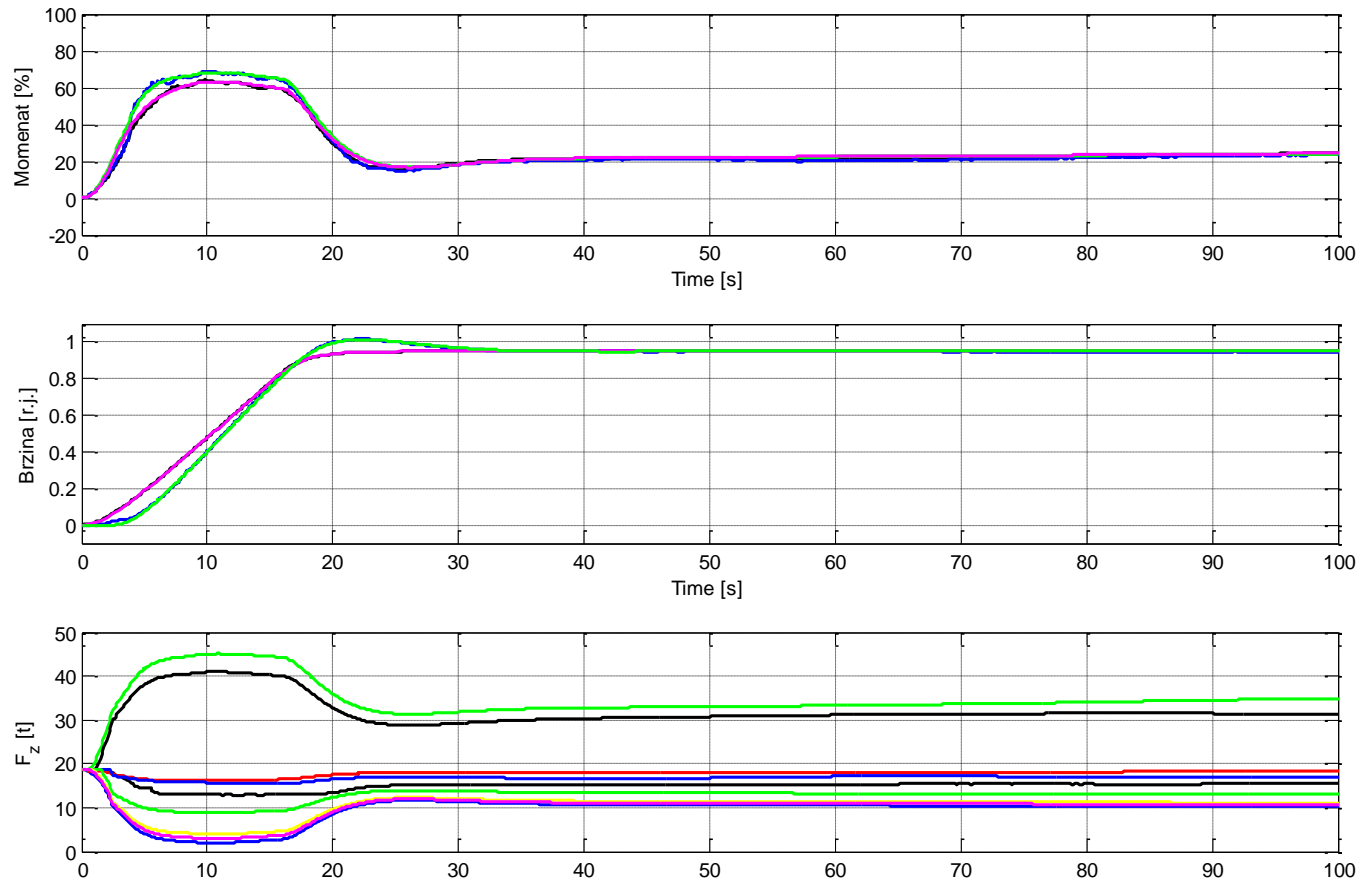
$$V_i = \int v \cdot (A_{ul\ i} - A_{iz\ i}) dt + V_{i0}$$

$$M_i = V_i \cdot \gamma$$

Blok dijagram osnovne strukture dinamičkog modela tračnog transportera [1]



Verifikacija dinamičkog modela pomoću rezultata merenja na terenu – start neopterećenog transportera [1]



Osnovni podaci o tračnom transporteru:

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

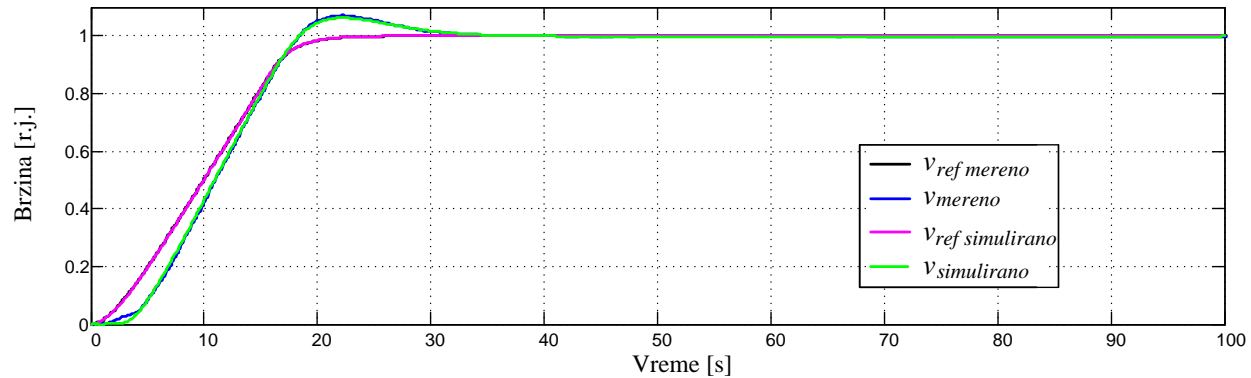
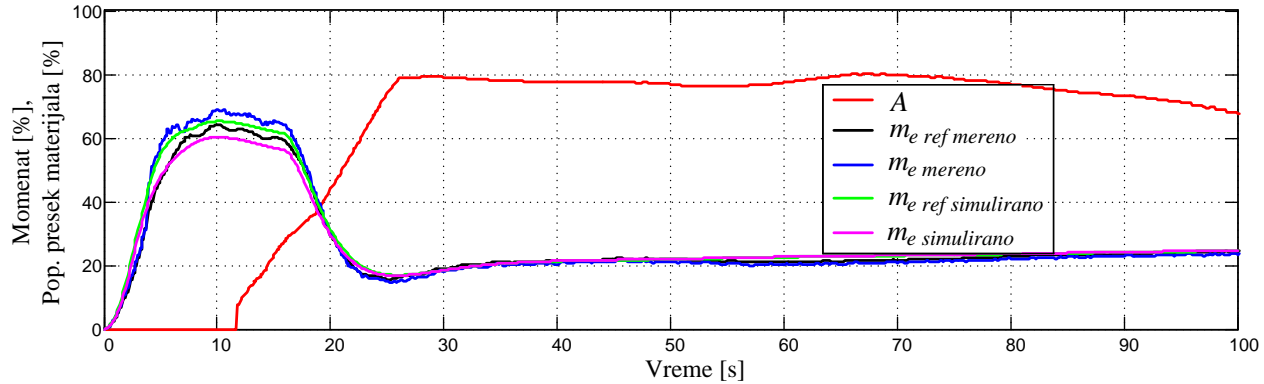
dužina segmenta $L=160$ m, dužina podsegmenta $L_{ps}=10$ m,

$C = 1,6875\cdot 10^9$ N/m, $B = 4972500$ Ns/m, specifična težina materijala $\gamma=1600$ kg/m³

pogon 3×1000 kW, 995 o/min, prečnik pogonskog bubnja 1,5 m,

prenosni odnos reduktora 17,267.

Verifikacija dinamičkog modela pomoću rezultata merenja na terenu – start opterećenog transportera [1]



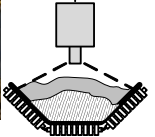
SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- **Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera**
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- Zaključak

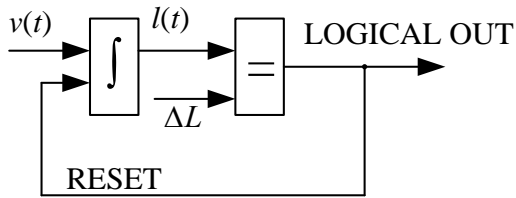
Presipno mesto između dva tračna transportera



Ultrazvučni senzor za merenje pop. preseka materijala



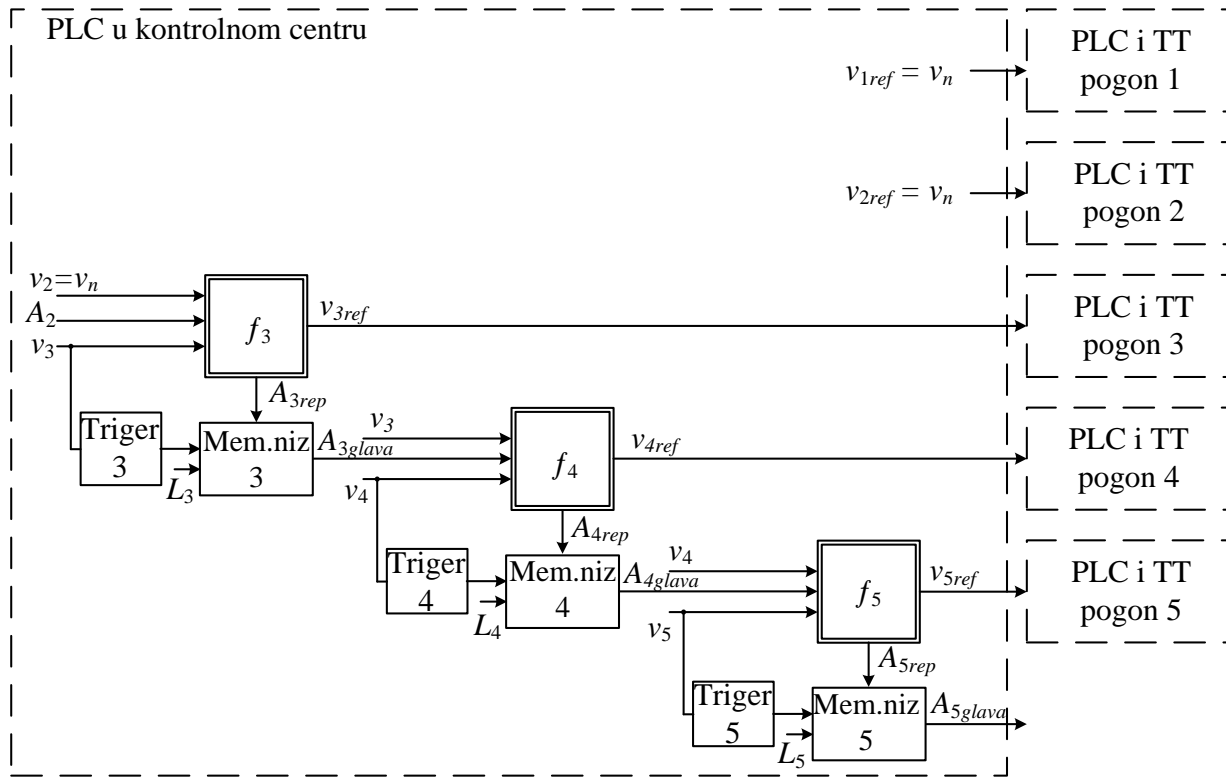
Presipno mesto između dva tračna transportera [1]



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

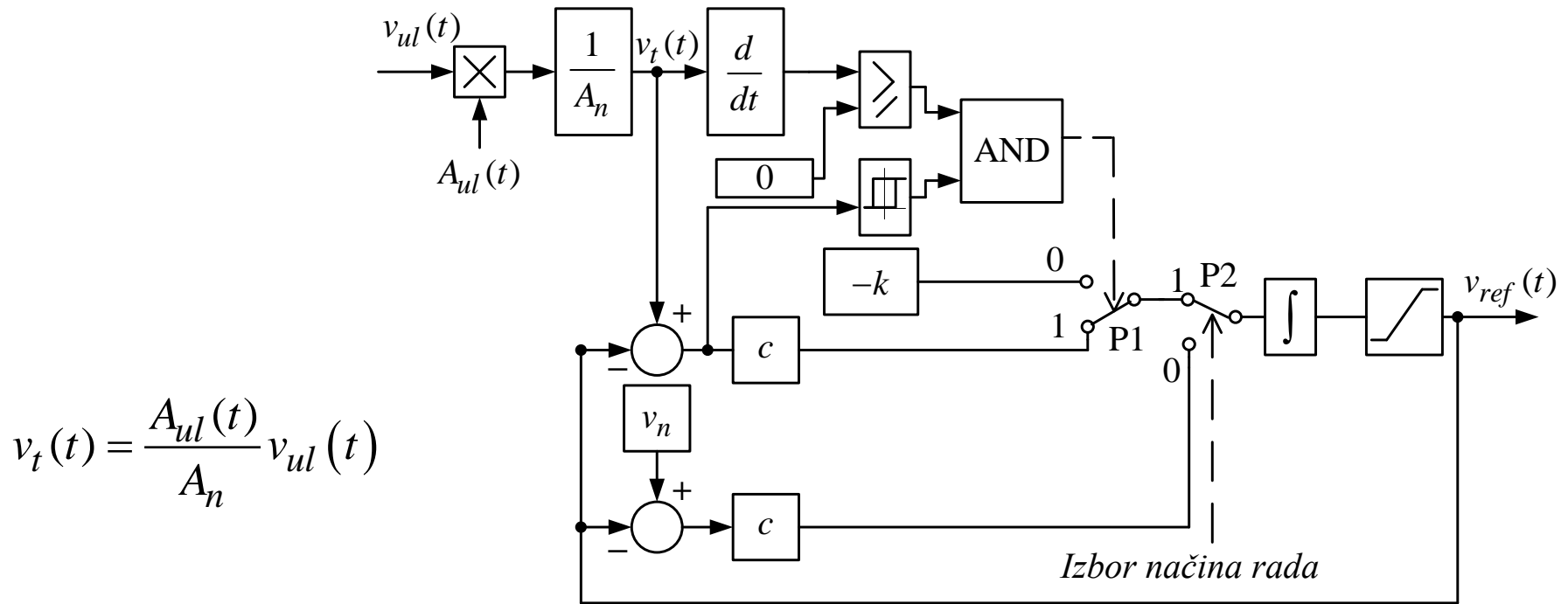
$$R = \frac{L}{\Delta L} \in \mathbb{N}$$

Određivanje vremena odabiranja



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

Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]



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

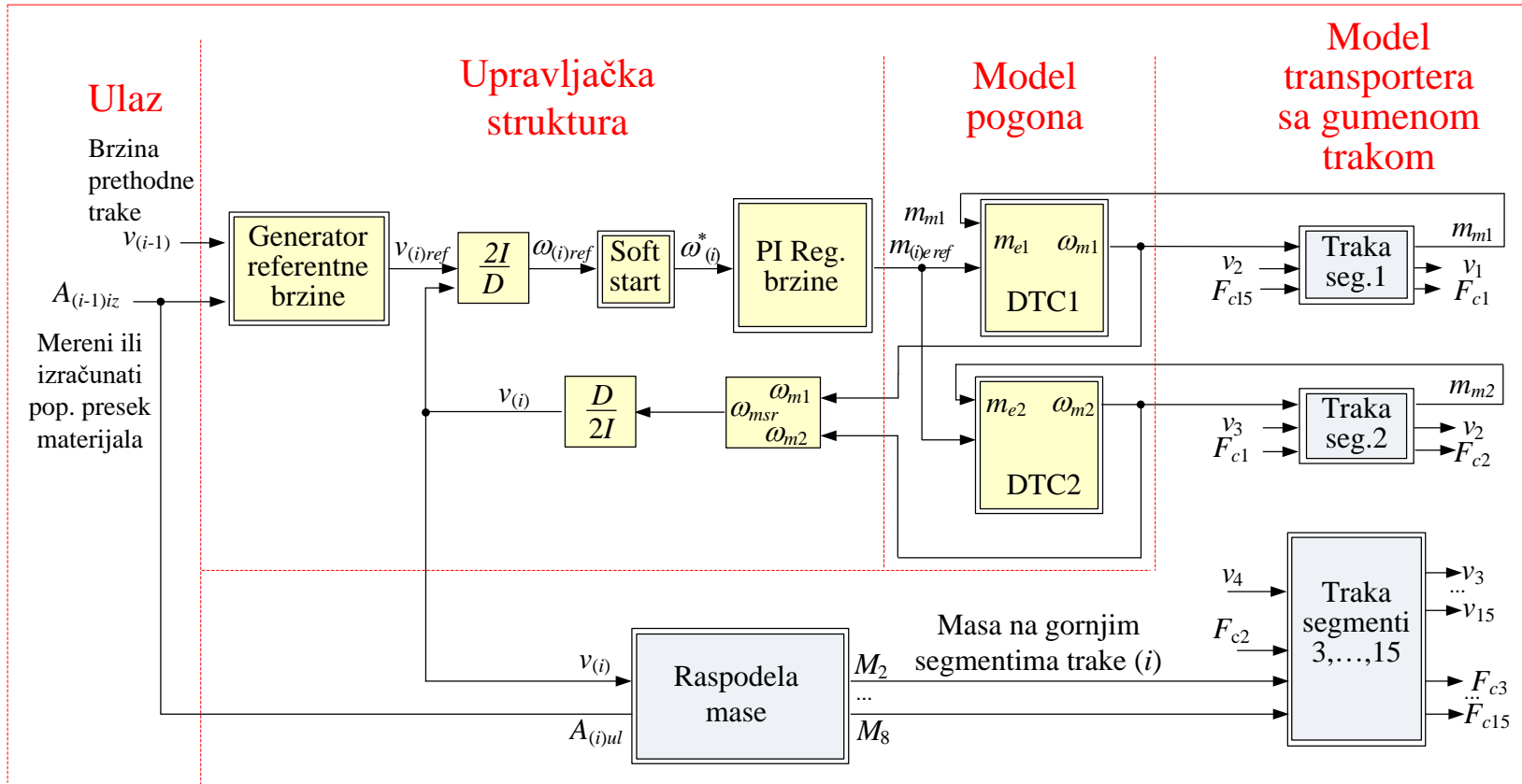
1. $\frac{dv_t(t)}{dt} \geq 0 \quad \wedge \quad v_t(t) - v_{ref}(t) \geq \varepsilon$
2. $\frac{dv_t(t)}{dt} < 0 \quad \vee \quad v_t(t) - v_{ref}(t) < -\varepsilon$

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

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

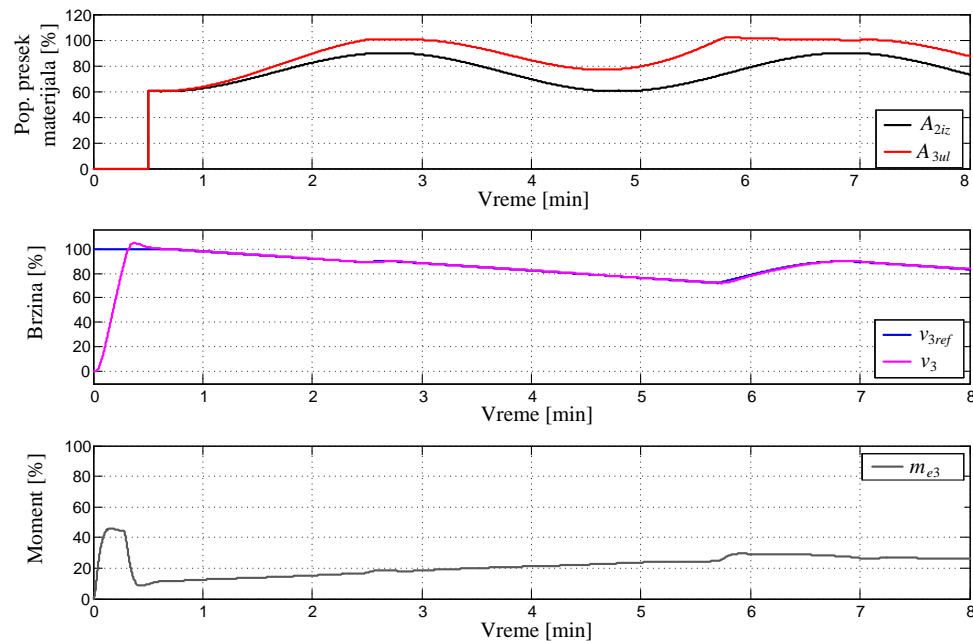
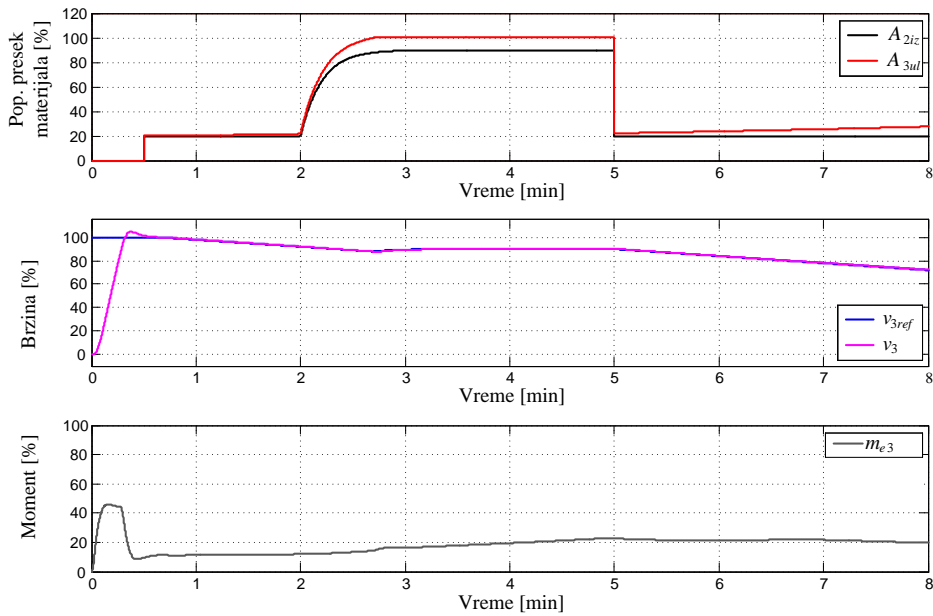
3. $v_{ref}(t) = c \int (v_n - v_{ref}(t)) dt + v_{ref}(t_3)$

Blok dijagram dinamičkog modela tračnog transportera sa primenjenim algoritmom za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]



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

Rezultati simulacija dobijenih primenom algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]



Konstantni koeficijent usporenja:

$$k = 0,001 \frac{v_n}{s} = 0,00465 \frac{m}{s^2}$$

$$A_{2iz}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t)$$

$$T_{sin} = 4 \text{ min}$$

Optimalna vrednost koeficijenta usporenja [1]

Kriterijumi za odredivenje optimalne vrednosti koeficijenta usporenja su:

$$1. \quad k(t) \leq \frac{v_n}{A_n} \frac{\Delta A_{ul}(t)}{\Delta t}$$

$$2. \quad k(t) \leq k_{max\ tehni\ cko} = 0,035 \frac{v_n}{s}$$

$$3. \quad k_{oe}(t) = \frac{m_m(t)}{J_{\Sigma}(t)}$$

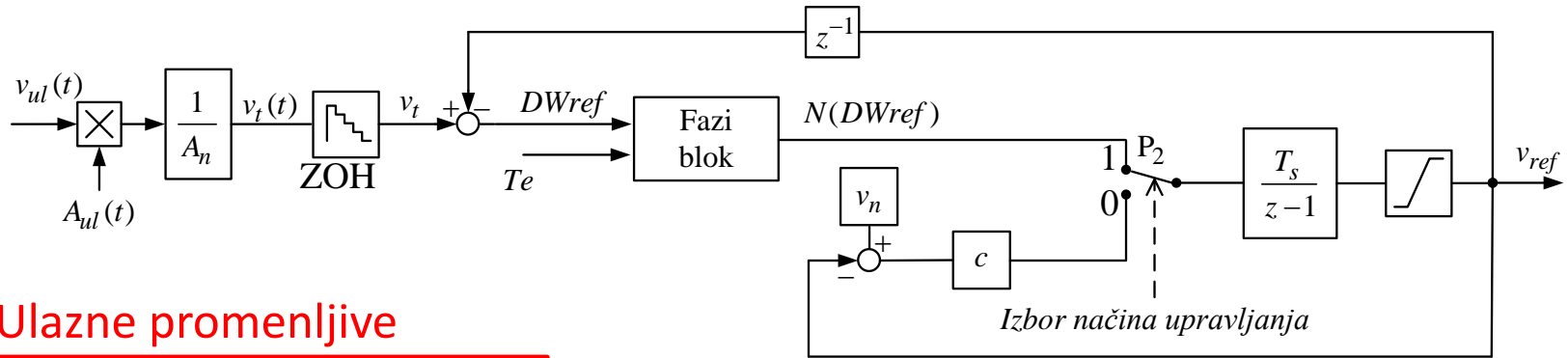
$$m_m(t) = m_{m0} + m_m(M_{bm})$$

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

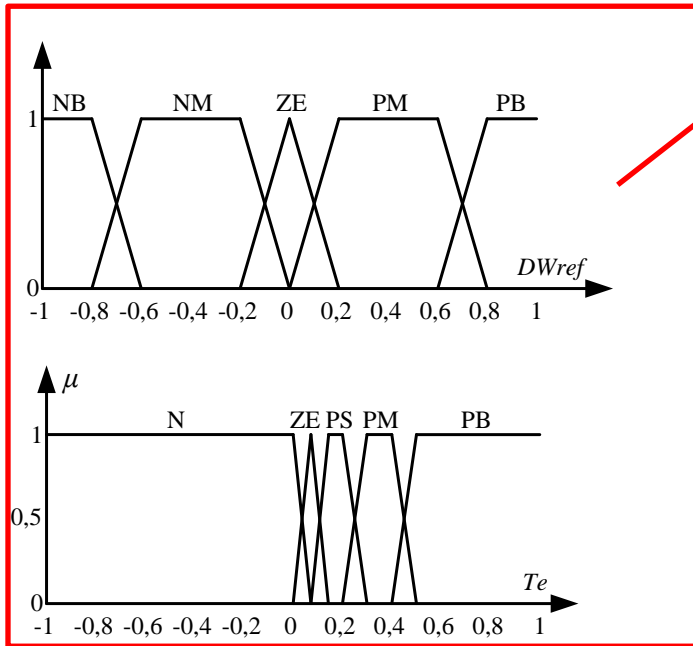
Ako je $k_{oe}(t) \geq k_{max\ tehni\ cko}$, onda je $m_e \geq k_{max\ tehni\ cko} \cdot J_{\Sigma}(t) - m_m(t)$

U algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera mora uvesti i merena vrednost za moment motora !!!

Algoritam za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera razvijen na bazi fazi logike [3]

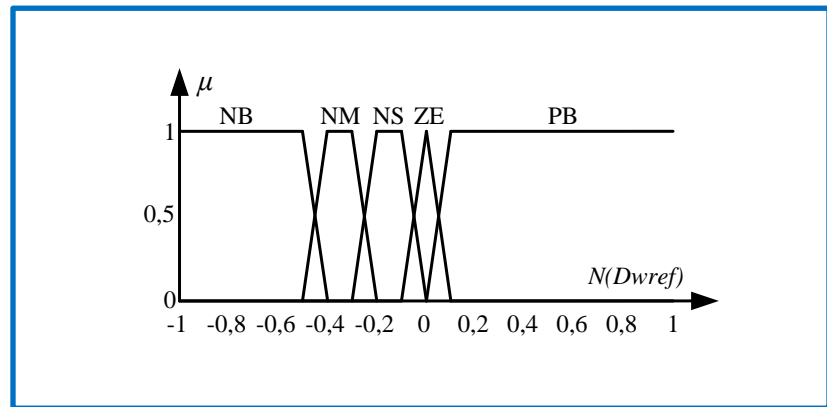


Ulazne promenljive



$$DWref(n) = v_t(n) - v_{ref}(n-1)$$

Izlazna promenljiva



fazi skupovi: negativan (N), negativan veliki (NB), negativan srednji (NM), nula (ZE), pozitivan mali (PS), pozitivan srednji (PM), pozitivan veliki (PB)

Fazi pravila i generisana površina upravljanja [3]

Fazi pravila

DW_{ref} \ T_e	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

Obrada fazi pravila: MIN-MAX
Defazifikacija: COG metoda
(centar gravitacije, centroid)

SIVA OBLAST:

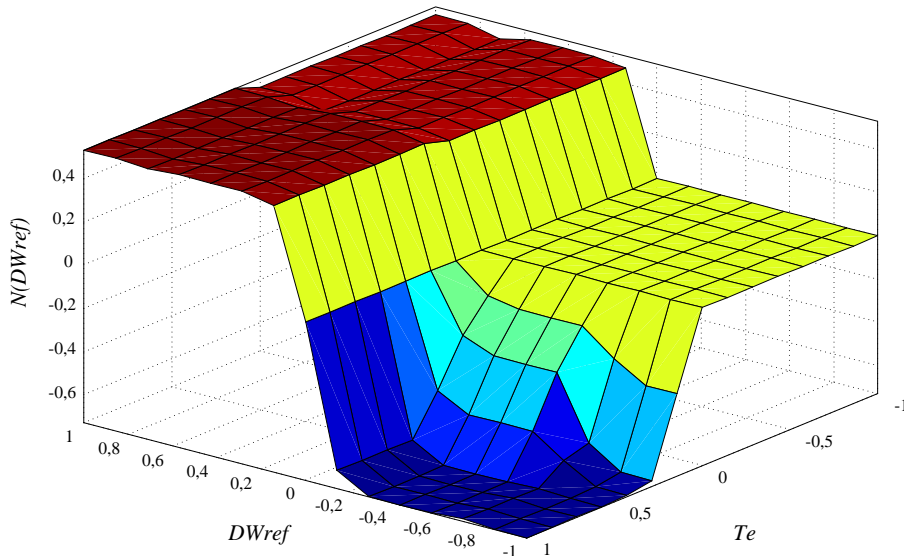
ako je vrednost momenta pogonskih motora bliska nuli, priraštaj referentne brzine mora da teži nuli sa ciljem da se izbegne aktiviranje električnog kočnja

SVETLO PLAVA OBLAST:

ako se ima mala promena referentne brzine na ulazu (nula), novi priraštaj referentne brzine takođe će težiti nuli, bez obzira na vrednost momenta pogonskih motora

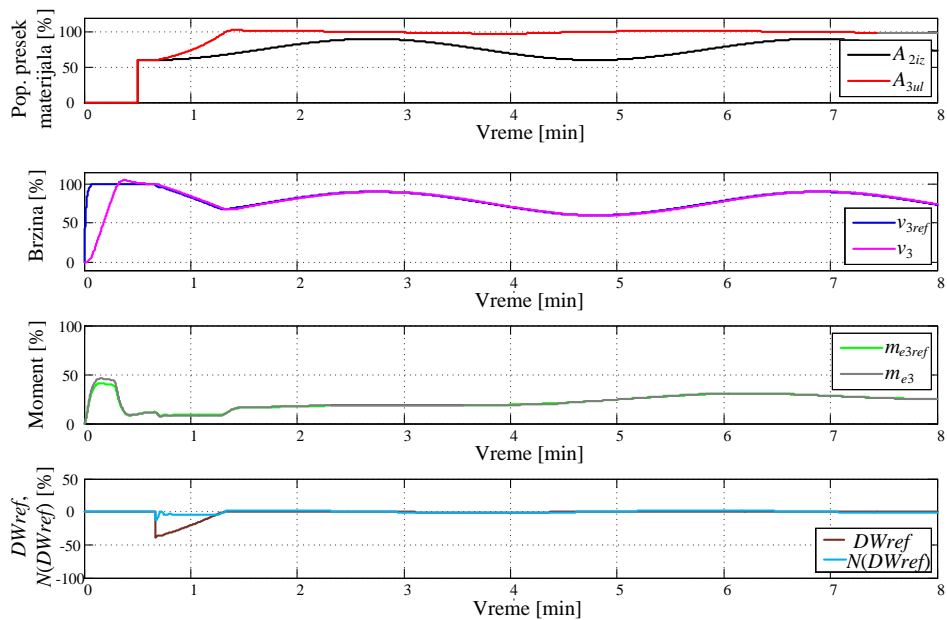
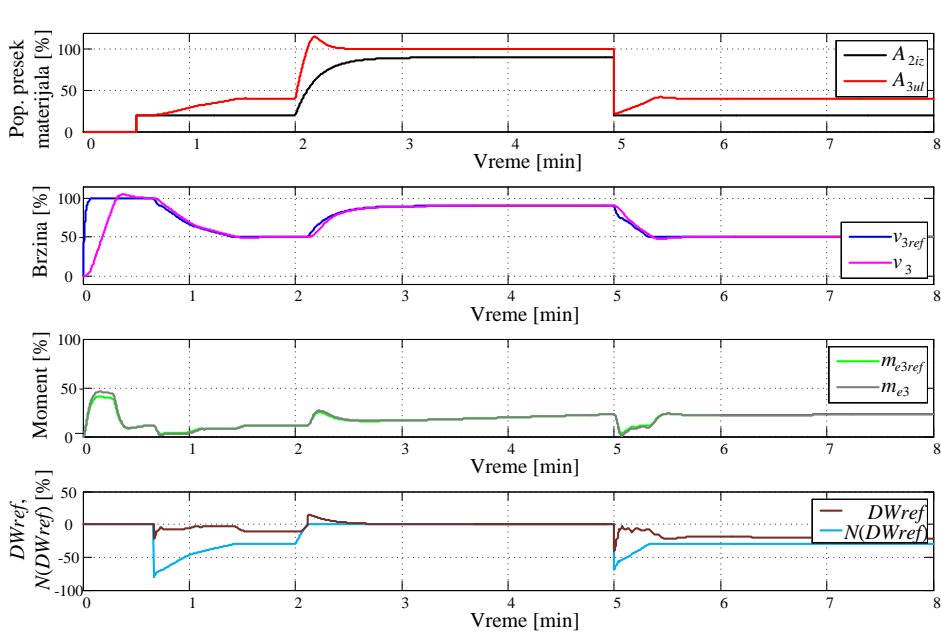
ROZE OBLAST:

ako se trenutna vrednost površine poprečnog preseka dolazećeg materijala na traku povećava, pogon tračnog transportera mora da se ubrza sa odgovarajućim ubrzanjem, da bi se izbeglo presipanje materijala preko ivica trake



Oblik generisane površine upravljanja

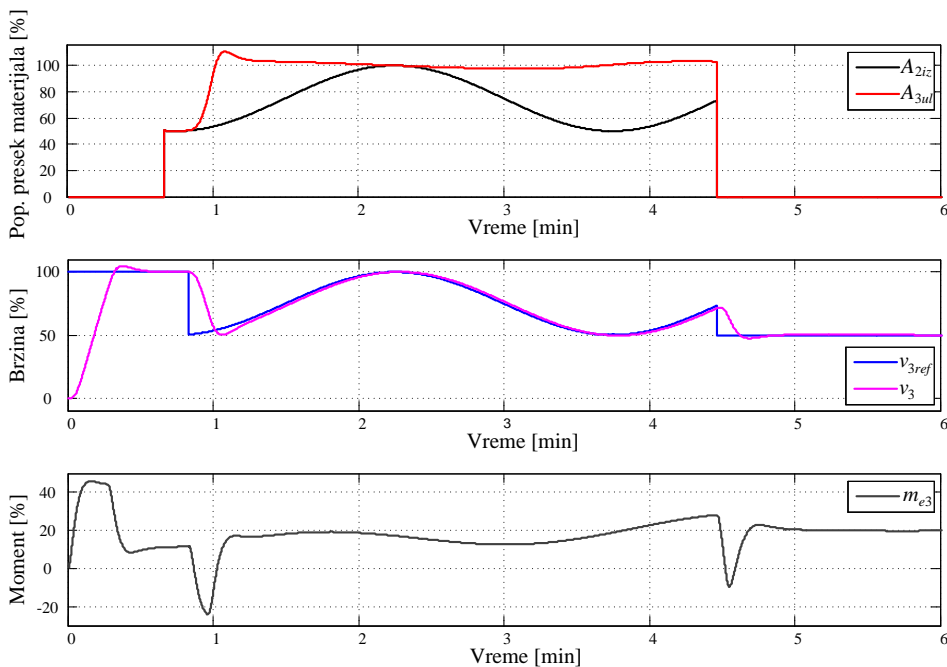
Rezultati simulacija dobijeni primenom algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike [3]



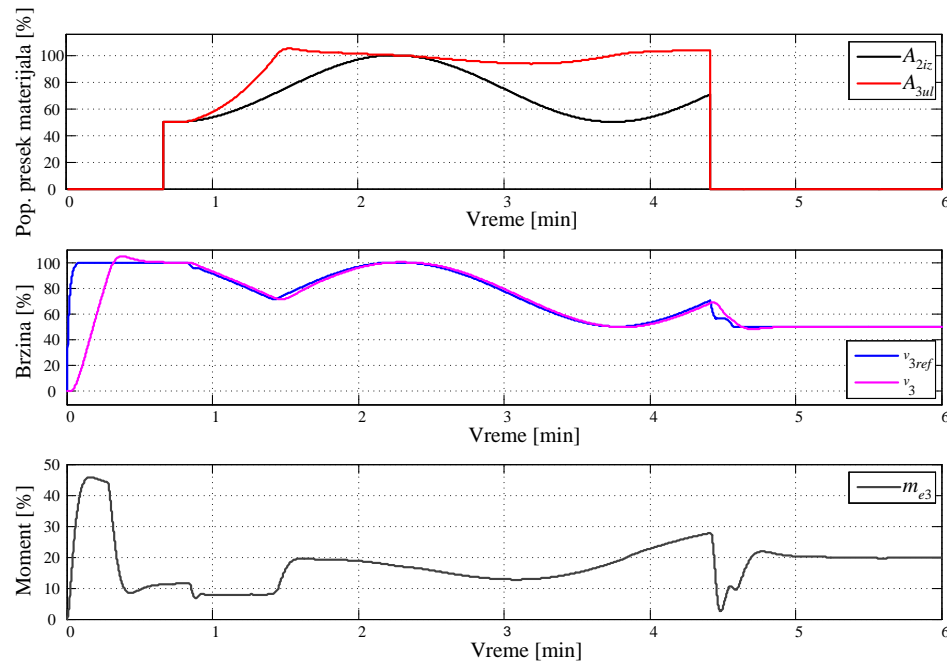
$$A_{2iz}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t)$$

$$T_{sin} = 4 \text{ min}$$

Prikaz uloge i verifikacija rada algoritma na bazi fazi logike na osnovu rezultata simulacija [3]



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



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

SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- **Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju**
- Zaključak

Komparativna analiza prikazanih algoritama sa stanovišta ostvarenih ušteta energije [3]

$$A_{ul}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t), A_{sr} \in [0,5, \dots, 0,9], A_{sin} = \pm 0,1 r.j., T_{sin} = 4 \text{ min}$$

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.

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
	$(\Delta W_{srC} - \Delta W_{srB}) [\%]$					

Komparativna analiza prikazanih algoritama sa stanovišta ostvarenih ušteda energije [3]

$$A_{ul}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t), A_{sr} \in [0,5, \dots, 0,9], A_{sin} = \pm 0,1r.j., T_{sin} = 2 \text{ min}$$

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
	$(\Delta W_{srC} - \Delta W_{srB})[\%]$					

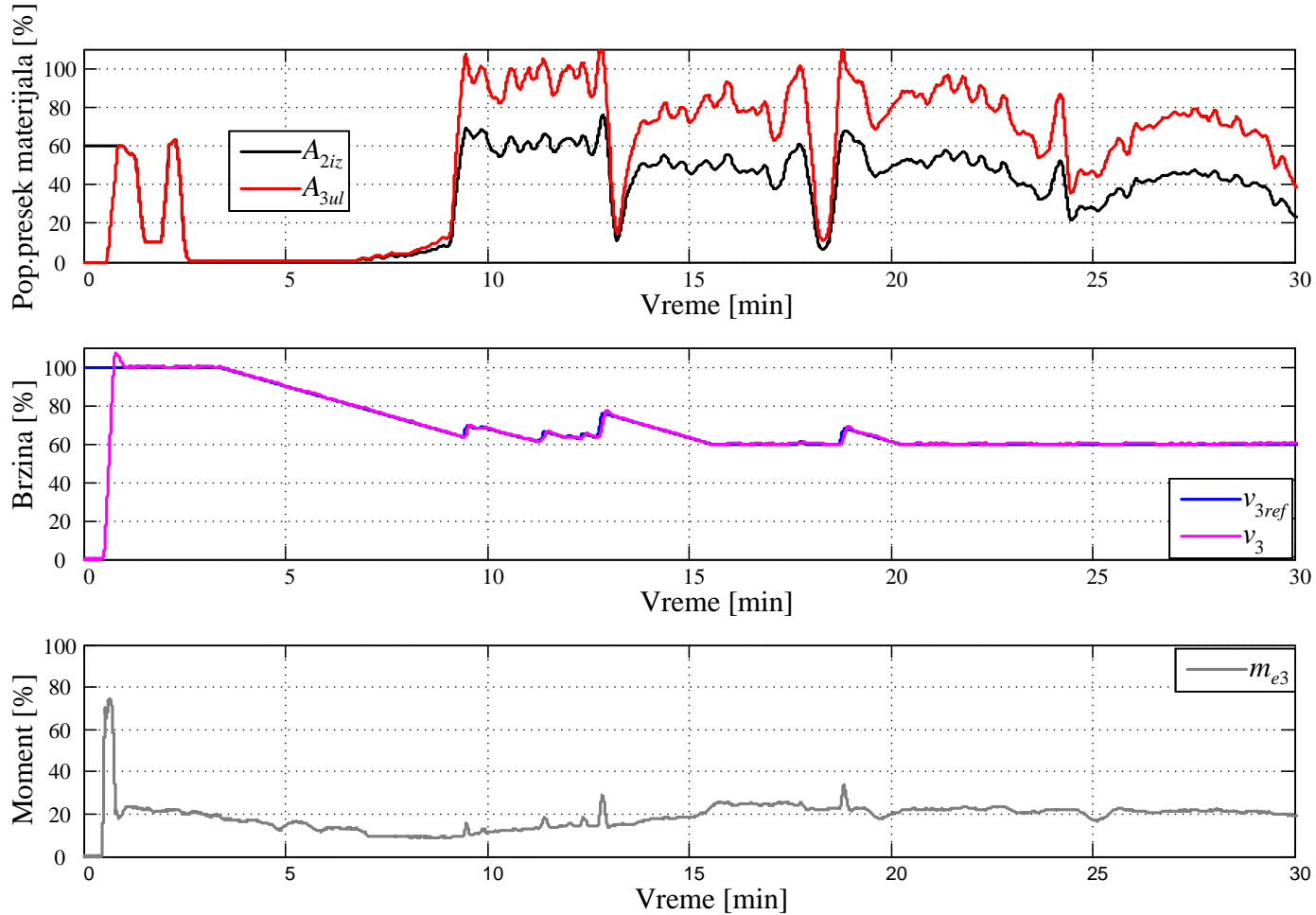
$$A_{ul}(t) = A_{sr} + A_{sin} \cdot \sin((2 \cdot \pi / T_{sin}) \cdot t),$$

$$A_{sr} = 0,75r.j., A_{sin} = \pm 0,25r.j., T_{sin} = 4 \text{ min}$$

$$\gamma_{novo} = 1,2\gamma_{staro}, \mu_{novo} = 2\mu_{staro}$$

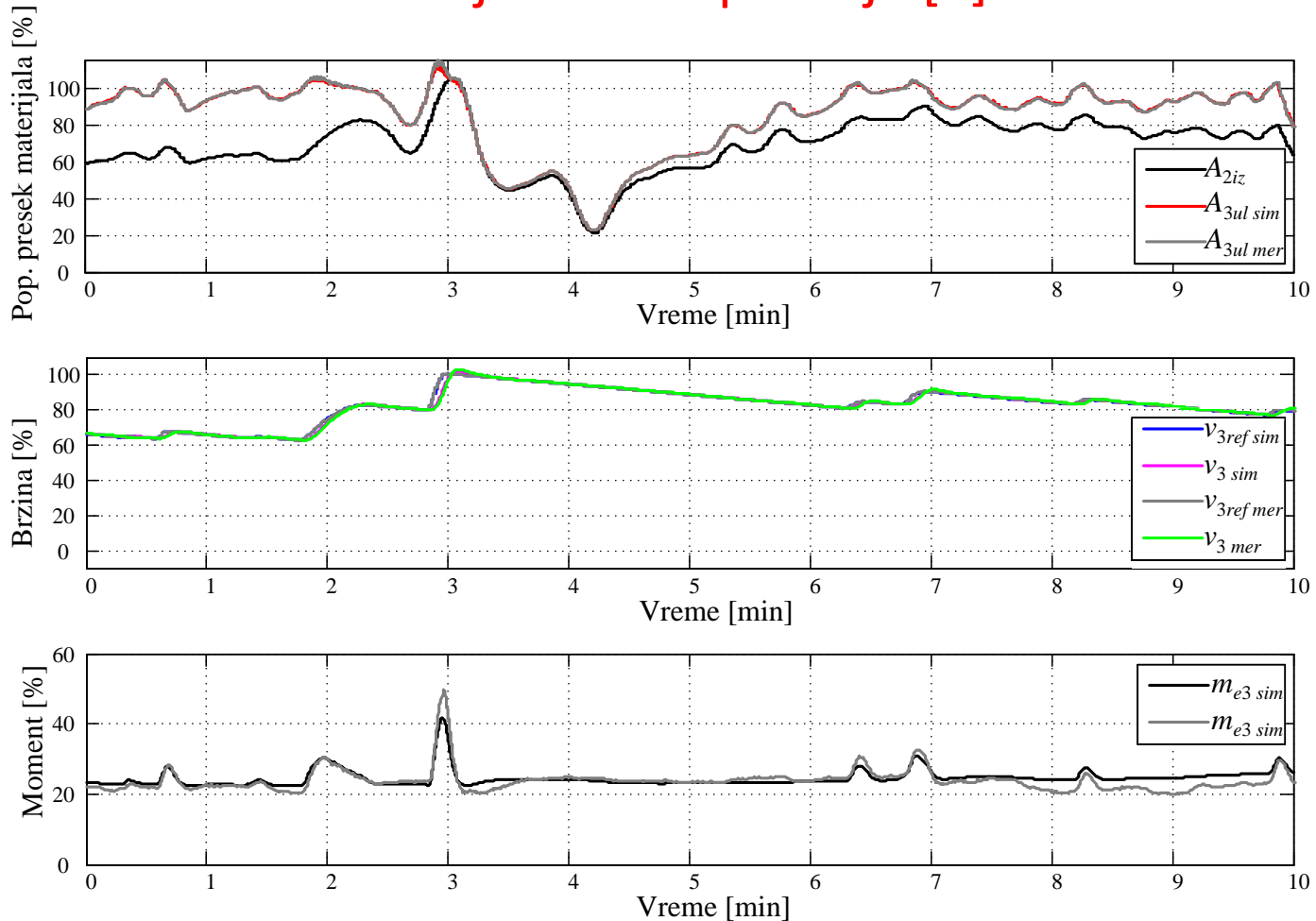
A_{sr} [r.j.]		0,75
A	P_{srA} [MW]	3,574
	W_{srA} [kWh/m ³]	0,955
B	$\Delta P_{srB} = (P_{srA} - P_{srB})[\%]$	3
	$\Delta W_{srB} = (W_{srA} - W_{srB})[\%]$	
C	$(P_{srB} - P_{srC})[\%]$	6,3
	$(W_{srB} - W_{srC})[\%]$	

Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]



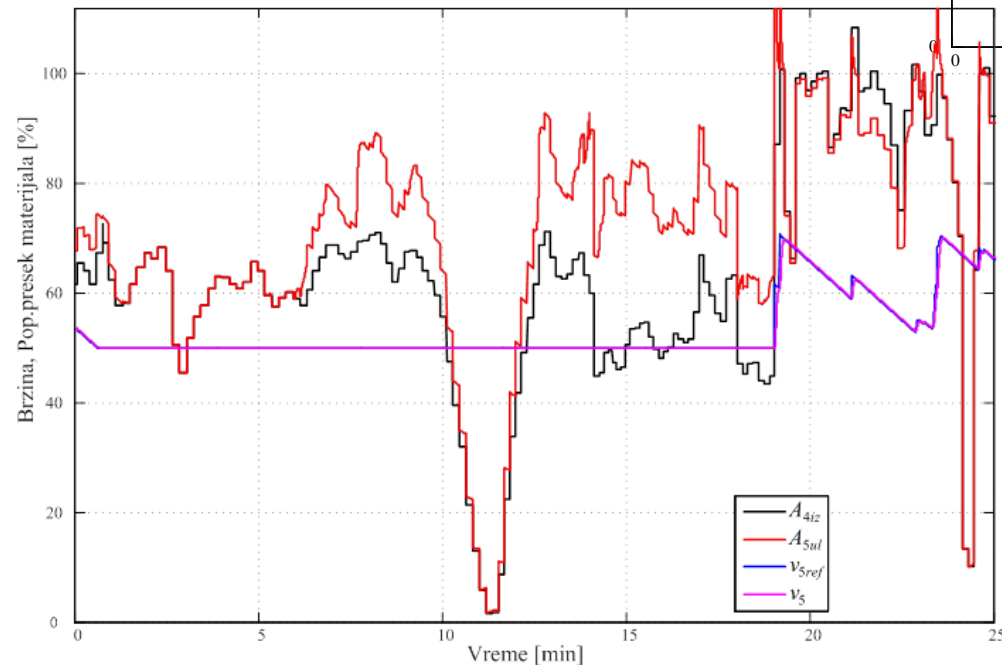
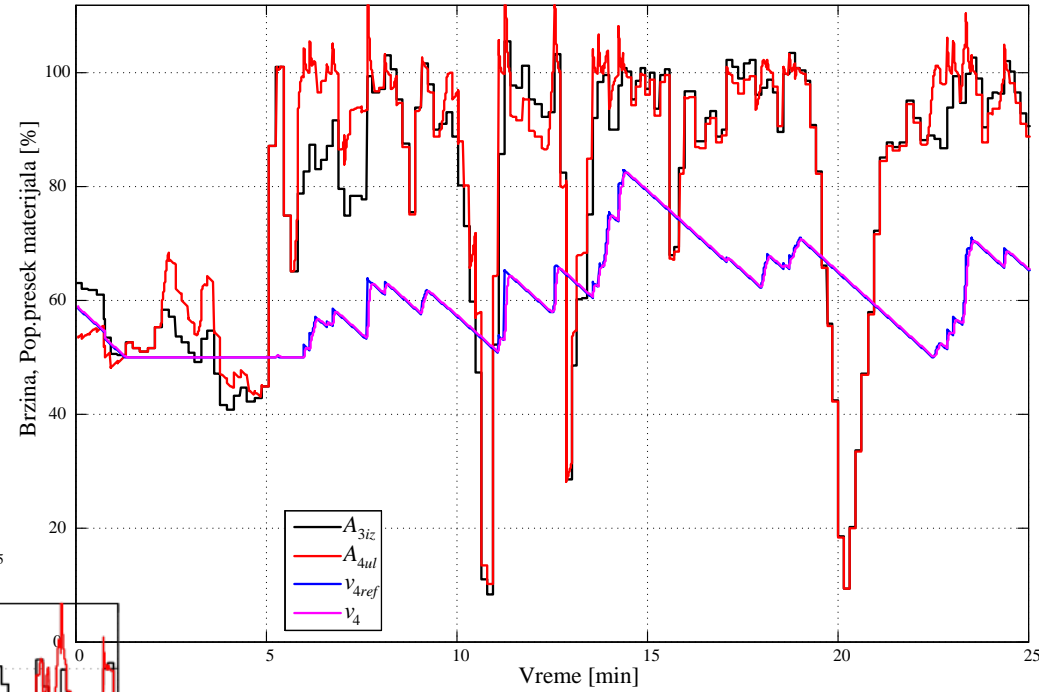
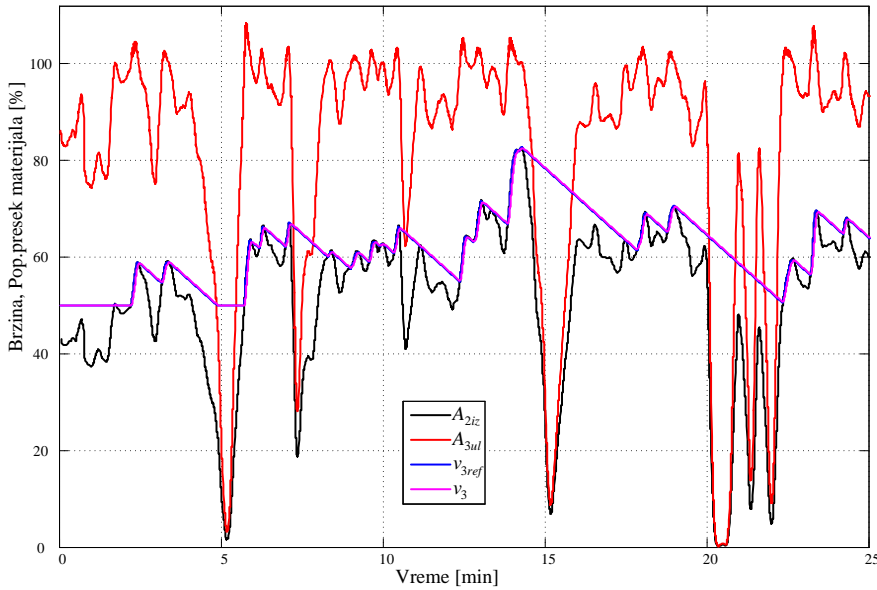
Karakteristične veličine pri radu prve vezne trake (treća traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja

Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]

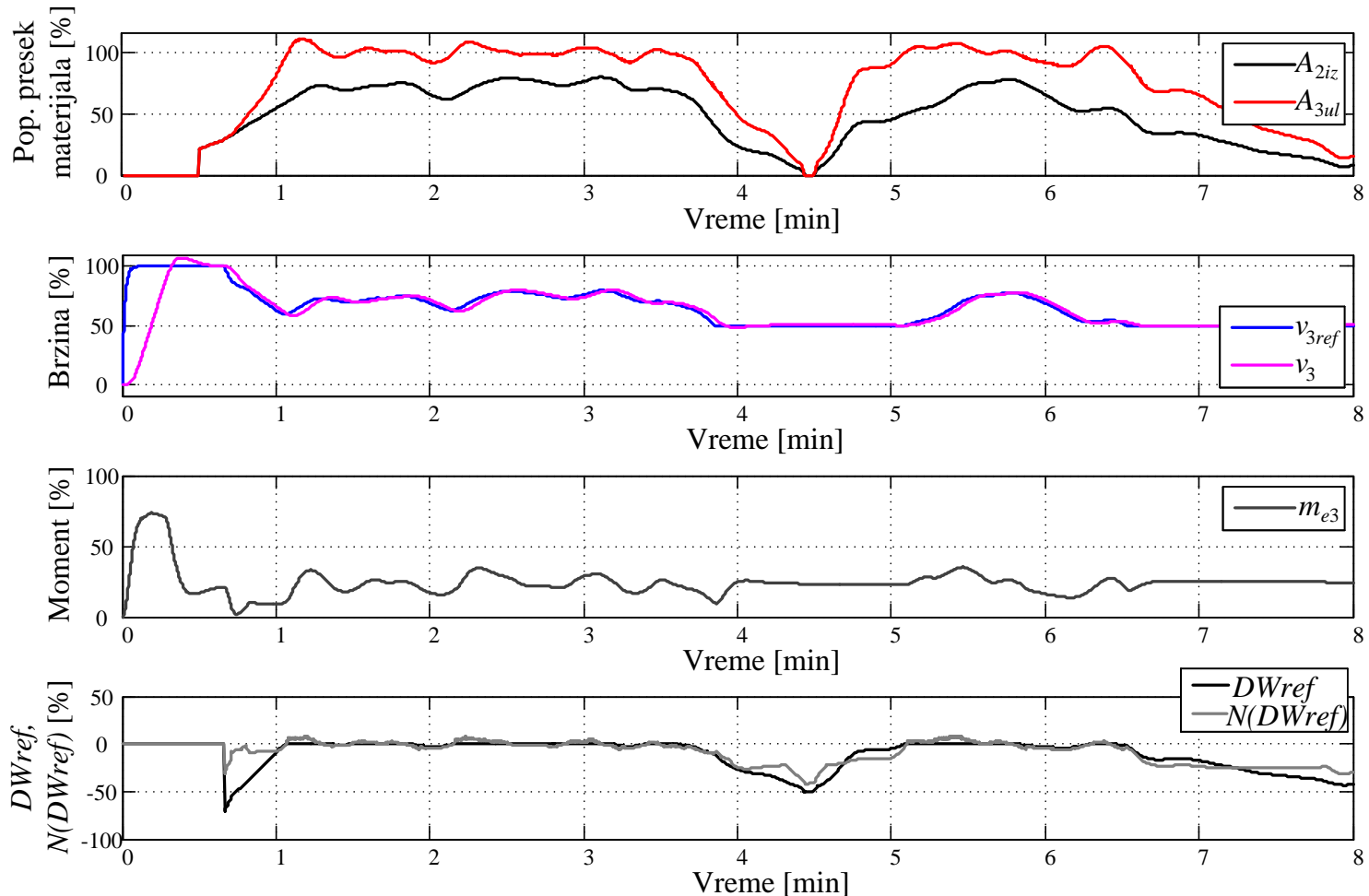


Karakteristične veličine pri radu prve vezne trake (treća traka u VBTO sistemu) sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 60% do 100% v_n primenom algoritma sa konstantnim koeficijentom usporenja: uporedni prikaz rezultata simulacije na modelu i rezultata dobijenih merenjem

Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera sa konstantnim koeficijentom usporenja [1]

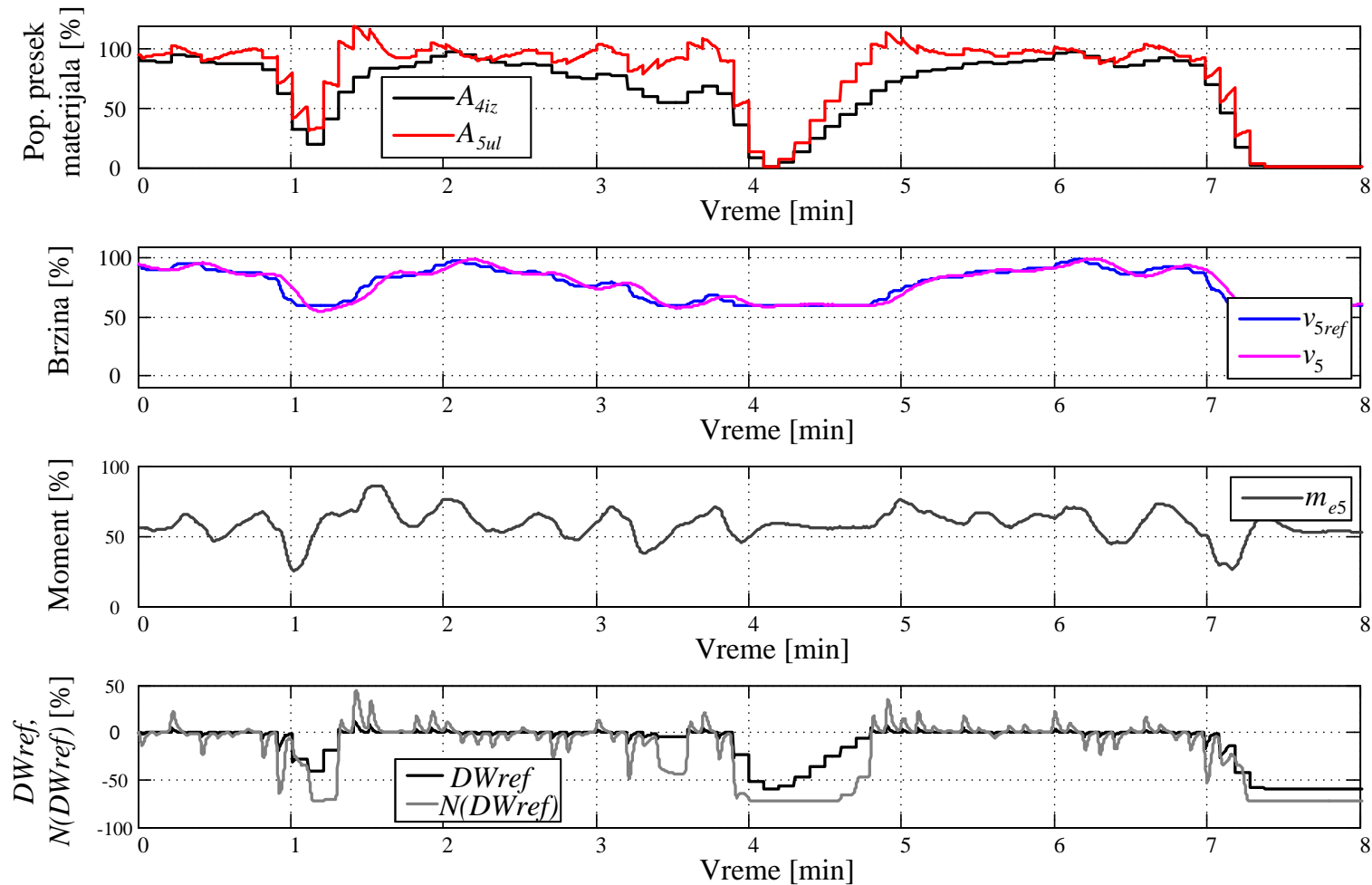


Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike [1]



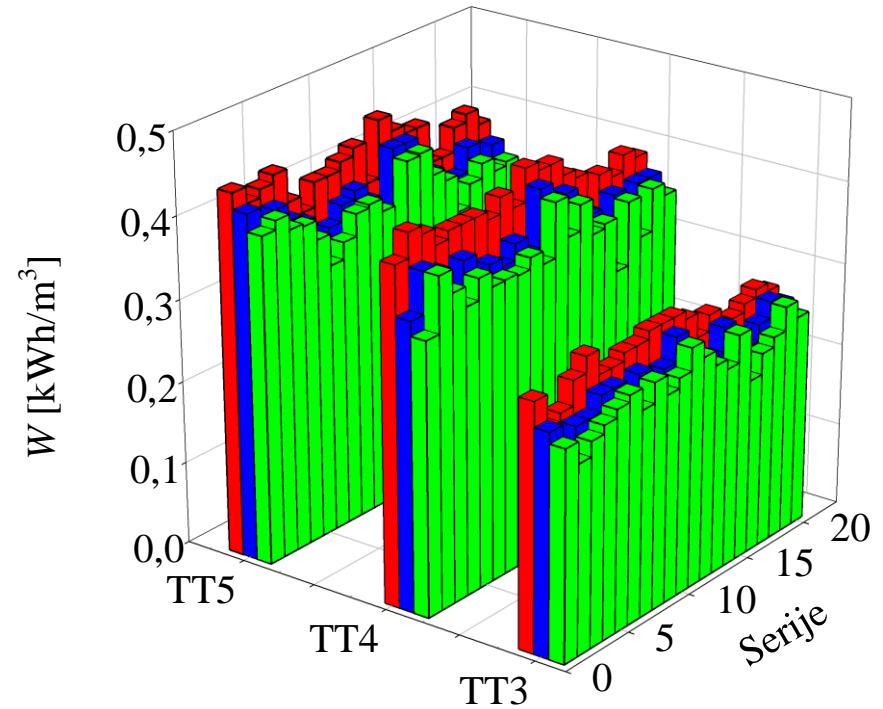
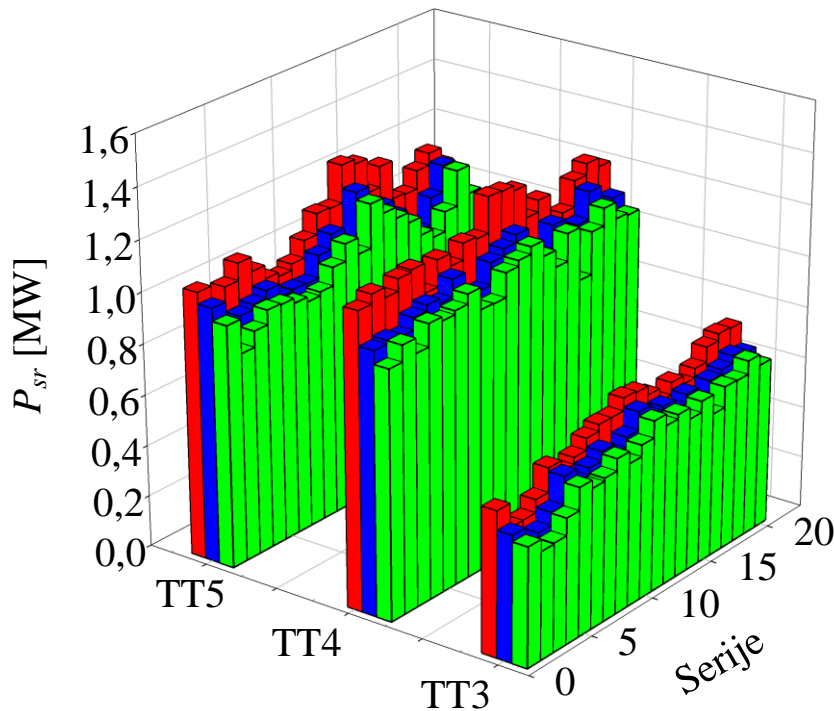
Karakteristične veličine za prvu veznu traku (treća traka u VBTO sistemu) i ulazne i izlazne veličine iz „look up” tabele visoke rezolucije: polazak tračnog transportera i prelazak iz rada sa stalnom brzinom u rad sa upravljanjem referentnom brzinom u opsegu od 50% do 100% v_n

Rezultati merenja za slučaj implementacije algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera na bazi fazi logike [1]



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

Rezultati merenja vrednosti za srednju snagu i srednju specifičnu energiju u slučaju transporta materijala konstantnom i promenljivom brzinom (pri implementaciji oba algoritma) [1]



Ušteda energije:

- ✓ Smanjenje srednje snage od 3% do 19%.
- ✓ Smanjenje srednje specifične energije od 2,5% do 19%.
- ✓ Poboljšanje postignuto primenom algoritma na bazi fazi logike u odnosu na algoritam sa konstantnim usporenjem od 0 do 2%

Analitička verifikacija izabranog rešenja u pogledu smanjenja potrošnje energije [1]

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

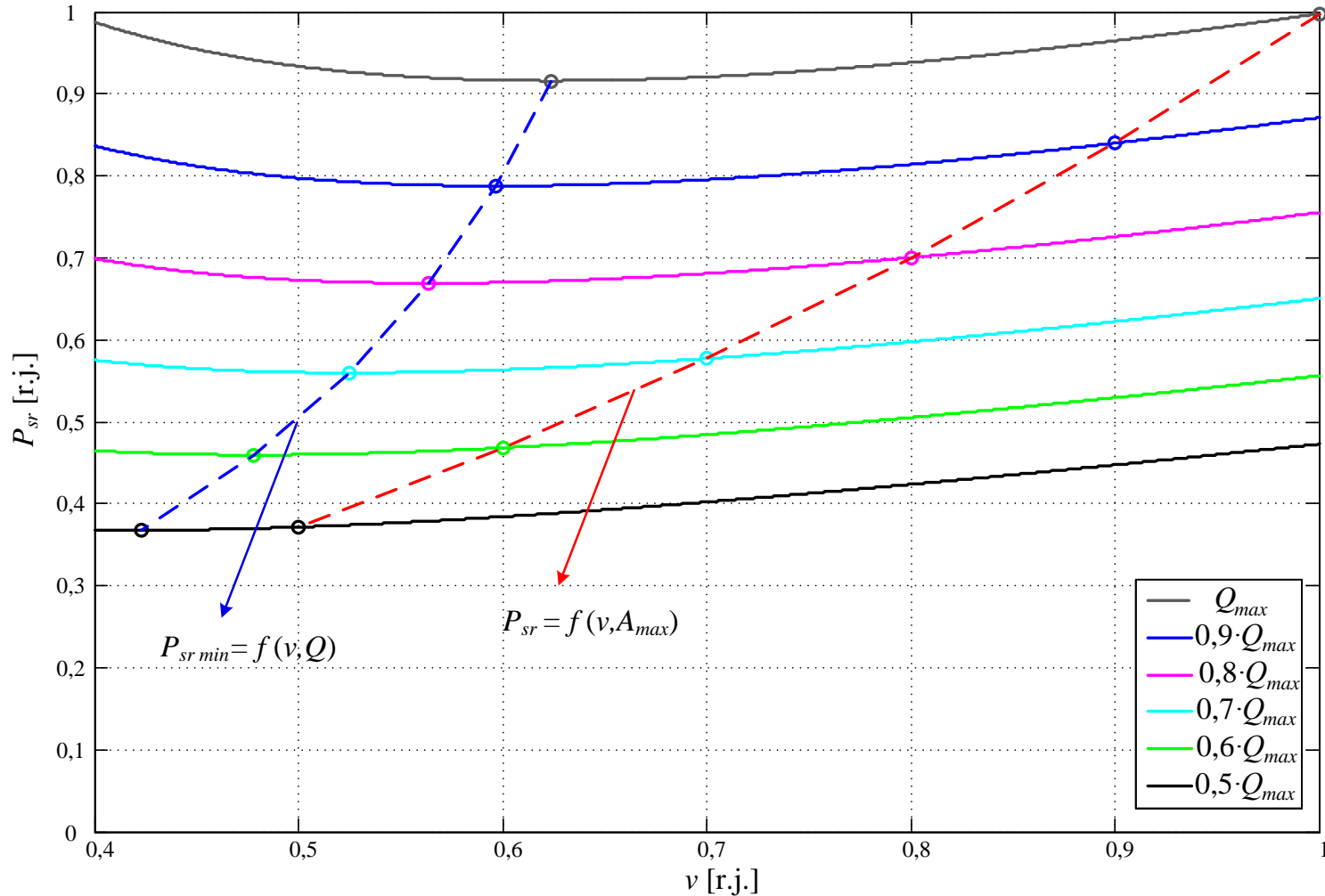
$$T \text{ [t/h]} = \gamma \text{ [t/m}^3\text{]} \cdot Q \text{ [m}^3\text{/h]}$$

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

gde je $c_1 = \max (T^2 \cdot v)$, $c_2 = \max (v)$, $c_3 = \max (T^2/v)$, $c_4 = \max (T)$
i $C = \max (P - v^2 \cdot T/3,6)$

$$\Theta[\text{r.j.}] = [0,003 \quad 1,3022 \cdot 10^5 \quad 0.038 \quad 70,3359]$$

Familija karakteristika $P_{sr} = f(v, Q = const)$ [1]



Stvarni minimum potrošnje energije neće odgovarati apsolutnom minimumu srednje snage, već srednjoj snazi određenoj ograničenjem po kapacitetu!

Postupak optimizacije sproveden na bazi sekvencijalnog kvadratnog programiranja (fmincon iz MATLAB Optimization Toolbox-a) [1]

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

Utrošena električna energija:
$$W_{el} = \int_{t_0}^t f_P(v(t), T(t)) dt$$

fmincon:

min $f(x)$ tako da

x

$c(x) \leq 0$, $ceq(x) = 0$, *nelinearna ograničenja*

$A \cdot x \leq b$, $Aeq \cdot x = beq$, *linearna ograničenja*

$LB \leq x \leq UB$, *LB – donja granica ulazne promenljive*

UB – gornja granica ulazne promenljive

Postupak optimizacije sproveden na bazi sekvencijalnog kvadratnog programiranja (fmincon iz MATLAB Optimization Toolbox-a) [1]

Postupak optimizacije:

$$\min W_{el}(v_j, Q_j : 1 \leq j \leq N) = \sum_{j=1}^{j=N} f_P(v_j, Q_j) t_s$$

$$Q_{ul} = Q [Q_1, \dots, Q_N]$$

pod uslovom da je :

$$M'_L [\text{kg/m}] = \gamma \cdot Q_{ul} / (3,6 \cdot v)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0,5 \cdot v_{max} \leq v_j \leq v_{max} \\ \frac{\Delta v_{min}}{t_s} \leq \frac{v_j - v_{j-1}}{t_s} \leq \frac{\Delta v_{max}}{t_s} \end{array} \right\} \text{linearna ograničenja}$$

$$\eta, T_{max} = \gamma \cdot Q_{max} \text{ i } M'_{Lmax}$$

Poznate vrednosti
za tračni transporter:

$$0 \leq M'_{Lj} \leq M'_{Lmax} \quad \text{nelinearna ograničenja}$$

$$t_s = 1\text{s}$$

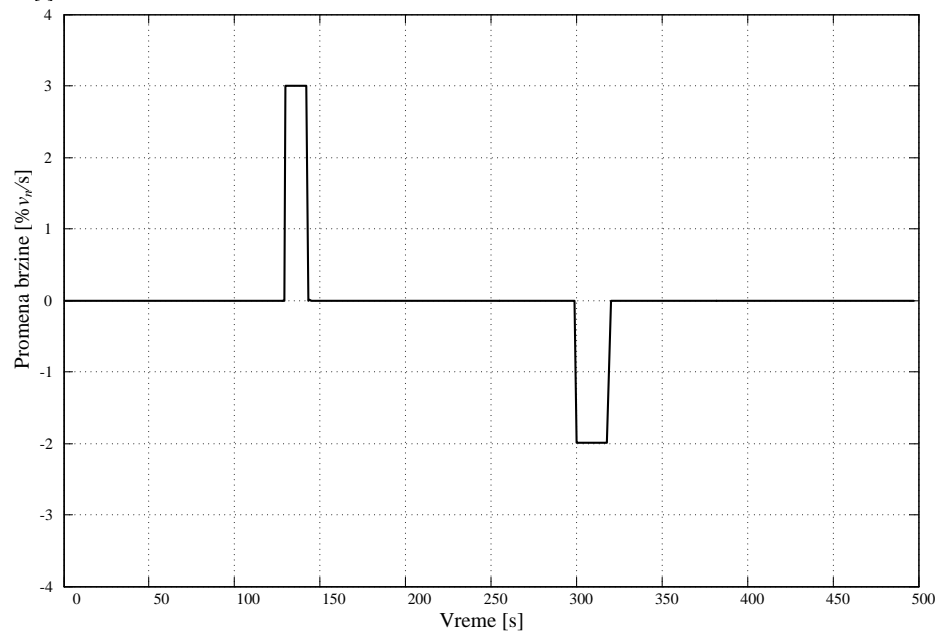
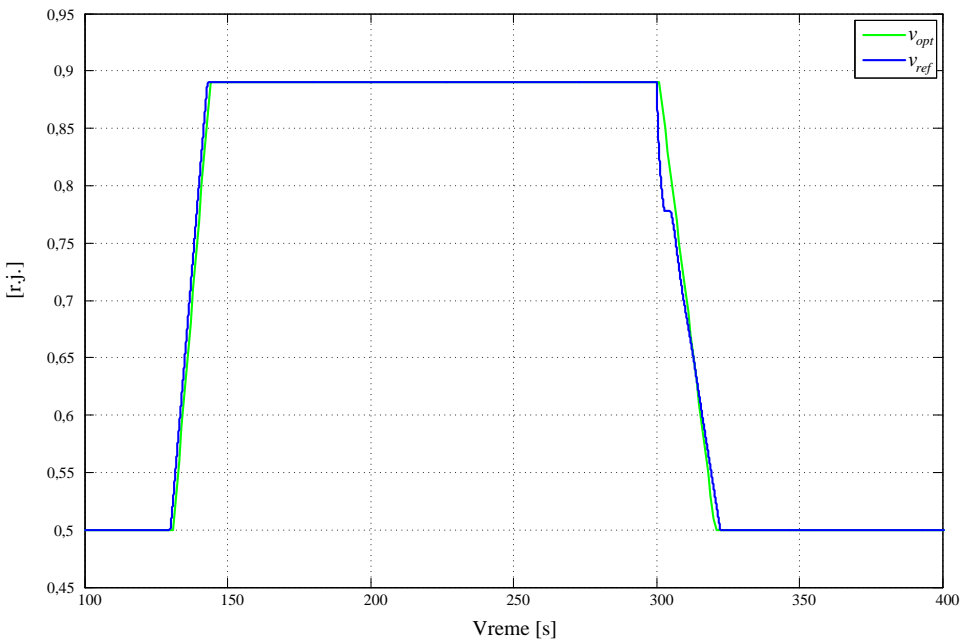
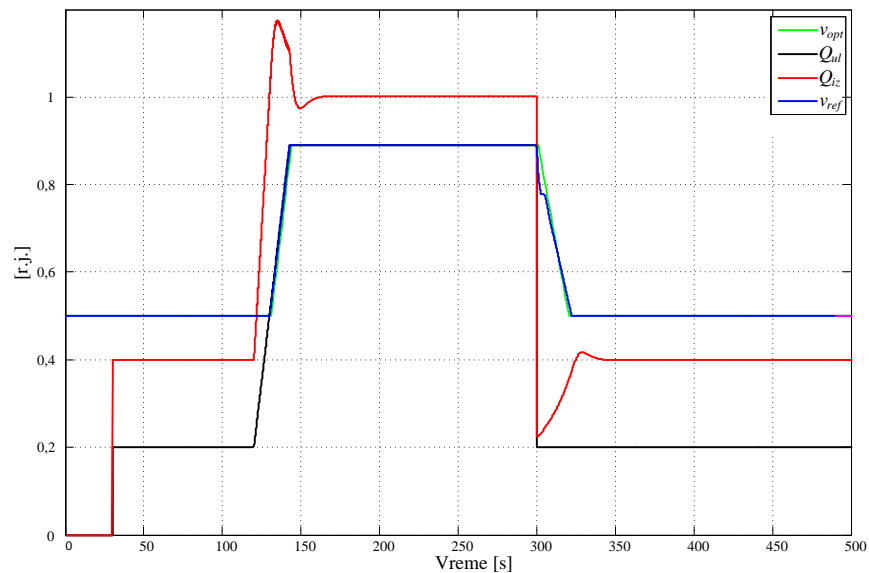
koeficijent ubrzanja iznosi $0,033 \frac{v_n}{t_s}$

koeficijent usporenja iznosi $0,02 \frac{v_n}{t_s}$

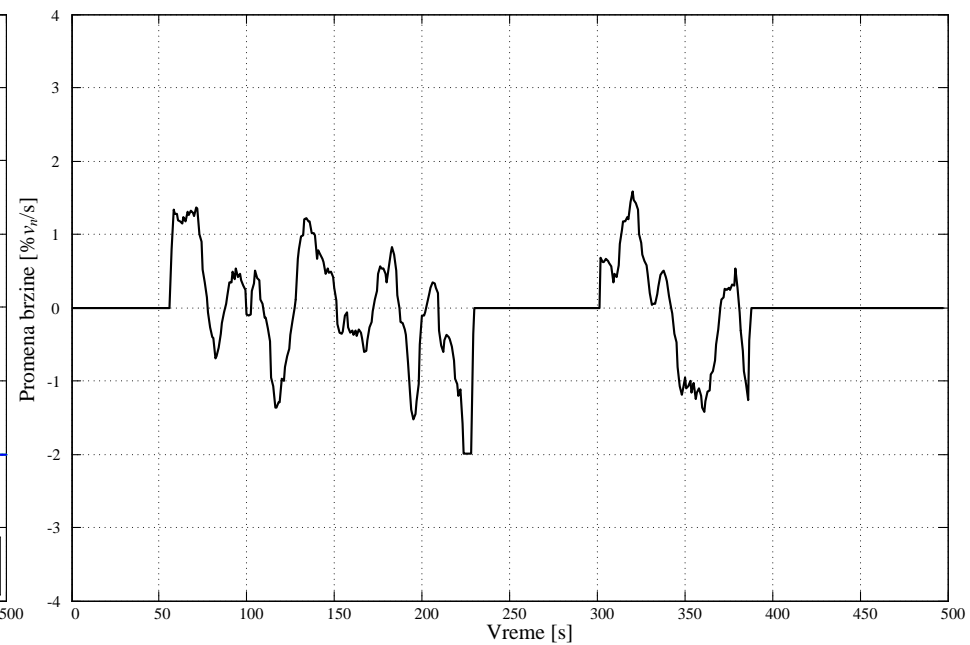
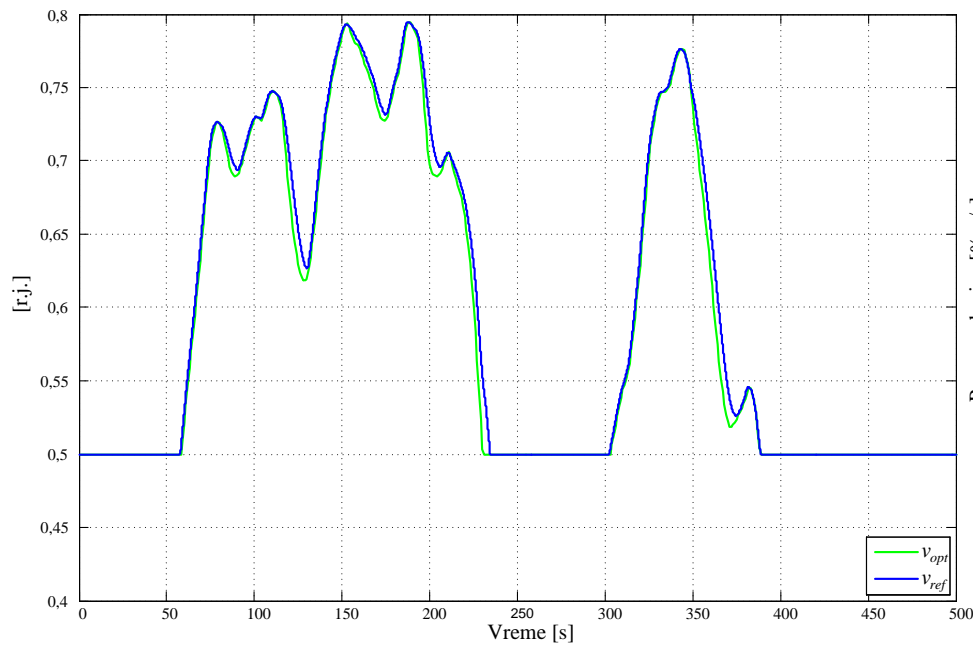
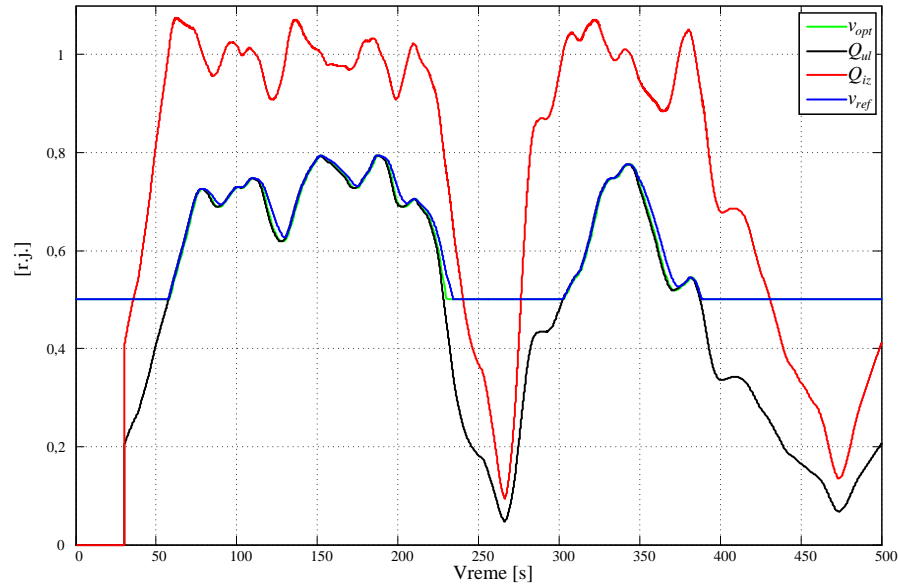
Rešenje:

$$v_{opt} = [v_{opt1}, \dots, v_{optN}]$$

Rezultati simulacije dobijeni primenom algoritma na bazi fazi logike i optimalna brzina v_{opt} - rezultat optimizacije dobijen pomoću MATLAB funkcije fmincon u teorijska promena transportovane količine materijala u vremenu [1]



Uporedni prikaz rezultata dobijenih za vremenski dijagram $Q_{ul}(t)$ snimljen na realnom sistemu [1]



SADRŽAJ

- Uvod
- Tračni transporter kao deo sistema na površinskom kopu
- Pogon transportera sa gumenom trakom
- Prednosti frekventno regulisanih pogona u odnosu na klasične pogone na tračnim transporterima
- Osnove za uštedu energije pri transportu materijala sistemom tračnih transportera sa promenljivom brzinom
- Dinamički model tračnog transportera
- Razvoj algoritma za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera
- Prikaz rezultata primenjenih algoritama snimljenih na realnom postrojenju
- **Zaključak**

Zaključak

- Cilj istraživanja - razvoj i primena algoritma za generisanje referentne brzine pojedinih transportera u sistemu transportera.
- Primenom različitih algoritama može se kontrolisati ubrzanje i usporenje trake, tako da se u okvirima ograničenja koja nameće sistem obezbedi minimalna potrošnja energije.
- Prednosti prikazanih algoritama za generisanje referentne brzine sistema tračnih transportera su:
 - 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.

Literatura

- [1] L. Ristić, "Razvoj algoritma za povećanje energetske efikasnosti sistema tračnih transportera na površinskim kopovima", doktorska disertacija, ETF, Univerzitet u Beogradu, 2012. god.
- [2] B. Bose, "Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, pp. 6-17, 2010.
- [3] 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.
- [4] „Projekat i realizacija rada rudarskih mašina na površinskim kopovima bez posade”, program istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije, pod rukovodstvom prof. dr B. Jeftenića, Katedra za energetske pretvarače i pogone, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2008-20011. god.
- [5] B. Jeftenić, M. Bebić, L. Ristić, S. Štatkić, "*Design and Selection of Belt Conveying Equipment & Systems*," **Chapter 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., (chapter) p. 60
- [6] B. Kolonja, B. Jeftenić, ... "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