

PROJEKTOVANJE I PODEŠAVANJE NEURO-FAZI REGULATORA SA PRIMENOM NA ROTORNIM BAGERIMA

Branislav Jevtović, *Viša poslovna škola Kosovo Polje - Blace*
Miroslav Mataušek, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu.*

Sadržaj – Sa stanovišta upravljanja površinski kop je složen proces koji obuhvata više podsistema kao što su rotorni bageri, transportne trake, odlagači i prateći elektro-mehanički sistemi. Produktivnost površinskih kopova, ako se uzmu u obzir sva primenjena tehnička rešenja na pomenutim objektima i uz poštovanje svih tehnoloških zahteva, praktično se svodi na produktivnost rotornih bagera.

U ovom radu će biti prikazano projektovanje i podešavanje neuro-fazi regulatora koji obezbeđuju realizaciju adaptivno-prediktivnog sistema upravljanja rotornim bagerima. Ovakav sistem upravljanja značajno povećava kapacitet kopanja, kao i raspoloživost i pouzdanost bagera.

1. UVOD

Rotorni bageri (Sl. 1.a) se primenjuju na površinskim kopovima kako za otkopavanje jalovine, tako i za kopanje uglja. To su izuzetno složeni elektro-mehanički sistemi, velikih masa i snage, koji obavljaju i translatorno i kružno kretanje. Da bi se obezbedila efikasna eksploatacija jednog ovakvog sistema, moraju se zadovoljiti sledeći oprečni zahtevi: maksimalni kapacitet kopanja uz minimalno opterećenje kako same mehaničke konstrukcije, tako i elektro-opreme u izvršnim organima.

Do sada predložena rešenja zasnivaju se ili na upravljanju bagerom tako da se obezbedi konstantnost kapaciteta kopanja (Q) usklađujući brzinu kružnog kretanja (V_k) sa geometrijom reza, ili tako da se obezbedi konstantnost opterećenja reznih elemenata, što samo u strogo ograničenim uslovima indirektno predstavlja konstantnost kapaciteta kopanja, te se retko primenjuje i dalje neće biti razmatrano. Za realizaciju ovih rešenja danas se primenjuje tehnologija rada sa horizontalnim rezovima (Sl. 1.b). Režimi rada rotornih bagera u tehnologiji horizontalnih rezova su sledeći: nastup, otkopavanje kružnim kretanjem, ponovni nastup, otkopavanje kružnim kretanjem u suprotnom smeru i ponavljanje ovih operacija N puta, odnosno, radom u rezu do dubine $S = N \cdot \Delta S$. Zatim se obavlja izlazak iz reza, spuštanje radnog točka na nivo sledećeg reza, čime se definiše visina reza ΔH , ponovni nastup i ponavljanje napred

navedenih operacija. Pri tome se vrši i korekcija osnovnih geometrijskih parametara reza: levog i desnog krajnjeg ugla, na slici Sl. 1.c označenih sa α_L i α_R , respektivno, i ukupne dubine reza određene sa $S = N \cdot \Delta S$.

Kružnim kretanjem bagera u fazi kopanja, rezni elementi radnog točka u materijalu koji se kopa, formiraju rez, koji se zbog oblika naziva „srpasti rez”. Stvarna debljina reza Δs je funkcija ugla zakretanja α . Njen maksimum se dobija u pravcu ose translatornog kretanja bagera, gde je jednak sa veličinom nastupa ΔS . Za ovaj pravac se tehnološki definiše osnovna brzina kružnog kretanja (V_o). Srpasti rez je prikazan na slici 1.c. Veličine nastupa (ΔS) i poluprečnika reza (R) zbog preglednosti slike nisu prikazane u realnim odnosima (praktično je $\Delta S : R = 1 : 50$). Zbog konstrukcijskih i bezbednosnih limitirajućih faktora, za brzinu kružnog kretanja je usvojeno sledeće ograničenje

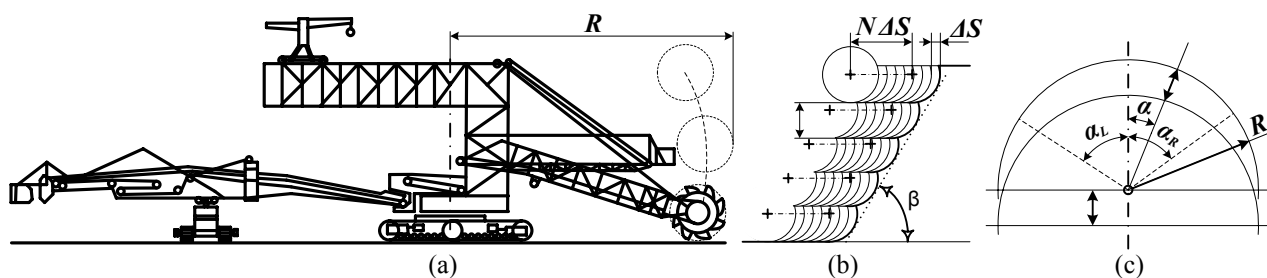
$$V_k(\alpha) = 2 \cdot V_o, |\alpha| \geq 60^\circ \quad (1)$$

Kompenzacija smanjenja debljine reza pri povećanju ugla zakretanja bagera α , a u cilju obezbeđivanja konstantnog kapaciteta kopanja, standardno se vrši promenom brzine kružnog kretanja po tzv. „kosinusnom zakonu” (2).

$$V_k(\alpha) = \frac{V_o}{\cos(\alpha)} \quad (2)$$

Međutim, nedostatak ovakvog prilaza je u tome što kod kopanja nehomogenih sredina, a kakve su inače skoro uvek u praksi, dolazi ili do preopterećenja elektro-mehaničke opreme ili do smanjenja kapaciteta kopanja. Probleme mora da razrešava operator čestim promenama referentnih vrednosti, pa iskorišćenje bagera u velikoj meri zavisi od njegovog iskustva, zamora itd. Eksploataciona iskustva pokazuju da su kvarovi relativno česti i skupi. U svakom slučaju, ovakvo rešenje ne obezbeđuje maksimalnu produktivnost, eksploatacionu ekonomičnost i pouzdanost.

Efikasno rešenje navedenih problema i zadovoljenje oprečnih zahteva, uz uvažavanje tehnoloških uslova i, pre svega, karakteristika materijala koji se kopa, postiže se adaptivno-prediktivnim sistemom upravljanja bagerom zasnovanim na neuro-fazi regulatoru.



Sl.1. (a) Rotorni bager, (b) tehnologija horizontalnih rezova i (c) srpasti rez

2. EKSPERTSKO ZNANJE O SILAMA REZANJA I PREDIKCIJA OPTEREĆENJA

Kao što je rečeno nehomogene sredine, izrazitije i češće u jalovinskom sloju, uzrokuju bitne promene uslova rada bagera. Efikasno rešenje upravljanja bagerom zahteva karakterizaciju i predikciju nehomogenosti materijala koji se kopa. Predikcija je omogućena činjenicom da se opterećenje reznih elemenata, odnosno sile kojima se sredina suprotstavlja reznim elementima bagera, prostorno iz reza u rez ne menja diskontinualno, tj. da se granice različitih opterećenja, prostorno posmatrano, uglavnom kontinualno prožimaju kroz rezove.

Karakterizacija materijala koji se kopa uobičajeno se svodi na opisne ocene operatera o tvrdoći materijala i težini kopanja, npr. karakterišući uslove kopanja kao: ekstremno lake, veoma lake, lake, normalne, teške, veoma teške i ekstremno teške [1]. S druge strane, na osnovu karakterističnih merenja Protodjakonow [2] je klasifikovao opterećenja reznih elemenata u 10 grupa, sa određenim brojem podgrupa u kojima se opsezi preklapaju. Očigledno problematika karakterizacije nehomogenosti sredine koja se kopa je izrazito fazi.

Put do realizacije adaptivno-prediktivnog upravljanja bagerom na osnovu slika opterećenja reznih elemenata nađen je kroz brojne simulacije na razvijenom nelinearnom modelu [3,4] i opsežne analize rada iskusnih bagerista na više tipova bagera, u različitim uslovima rada. Ove analize omogućene su time što je na Polju „D“ u Kolubari radilo 6 bagera istog tipa – SRs 1200, gde je na jednom od njih i implementiran razvijeni regulator. Nalazeći korelaciju između merenja

opterećenja, uslova rada, tehnoloških parametara kopanja i upravljanja, došlo se do bitnih zaključaka pomoću kojih je određen tip i struktura, kao i deo parametara regulatora.

Pre svega, usvojeno je da je za određivanje opterećenosti reznih elemenata dovoljan konačan diskretan skup zavisao od ugla α , u koji se preslikavaju opsezi merenih veličina struje radnog točka I_{bw} na odgovarajućim uglovima i u odgovarajućim režimima kopanja. Režimi kopanja definisani su tangencijalnom brzinom reznih elemenata V_k , odnosno kružnim kretanjem bagera. Ako se uzme u obzir da se ugao zakretanja α meri diskretno, sa uglom diskretizacije $\Delta\alpha=0,5^\circ$, jasno je da se za memorisanje opterećenja mora uvesti diskretna funkcija opterećenja $L(\alpha)$ kao funkcija od V_k i I_{bw} , za svaku diskretnu izmerenu vrednost ugla zakretanja α . Za bagera pomenutog tipa funkcija opterećenja $L(\alpha)$ određena je fazi pravilom prikazanim u Tabeli 1. Drugim rečima karakterizacija nehomogenosti sredine kopanja definisana je kroz 4 kategorije uslova kopanja.

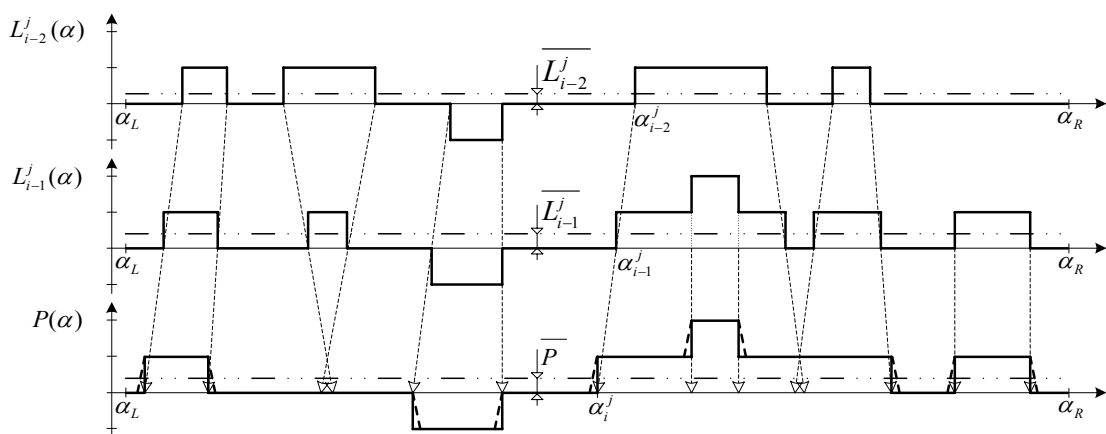
Zbog konstantnog nastupa ΔS i visine reza ΔH , moguće je na svakom sloju rezova ($j \cdot \Delta H$) linearnom ekstrapolacijom uglova diskontinuiteta (α_{i-1}^j i α_{i-2}^j) opterećenja prethodna dva reza ($L_{i-1}^j(\alpha)$ i $L_{i-2}^j(\alpha)$) odrediti ugao diskontinuiteta α_i^j predikcije $P(\alpha)$:

$$\alpha_i^j = (2 \cdot \alpha_{i-1}^j - \alpha_{i-2}^j) / 2 \quad (3)$$

čime se postiže prostorno praćenje zakrivljenosti granica slojeva istog opterećenja, a time je predikcija $P(\alpha)$ opterećenja $L_i^j(\alpha)$ definisana, kao što je prikazano na slici 2 i memoriše se kao diskretni skup vrednosti $P(i \cdot \Delta\alpha)$.

Tabela 1. Fazi pravilo za definisanje opterećenja $L(\alpha)$ kao funkcije od V_k i I_{bw}
(**UL**-podopterećenje; **NL**-normalno opterećenje; **OL**-preopterećenje; **SL**-superopterećenje;
Indeksi: **o**-prazan hod i **n**-nominalna vrednost)

V_k	I_{bw}				
	$I_{bwo} \leq I_{bw} \leq 0.8I_{bwn}$	$0.8I_{bwn} < I_{bw} \leq I_{bwn}$	$I_{bwn} < I_{bw} \leq 1.2I_{bwn}$	$1.2I_{bwn} < I_{bw} \leq I_{bwnmax}$	$I_{bw} > I_{bwnmax}$
$V_k < 0.86V_{kn}$	0 (NL)	+1 (OL)	+2 (SL)	+2 (SL)	+2 (SL)
$0.86V_{kn} \leq V_k \leq 1.14V_{kn}$	-1 (UL)	0 (NL)	0 (NL)	+1 (OL)	+2 (SL)
$V_k > 1.14V_{kn}$	-1 (UL)	-1 (UL)	0 (NL)	0 (NL)	+1 (OL)



Sl. 2. Predikcija $P(\alpha)$ opterećenja $L_i^j(\alpha)$ u i -tom rezu j -tog sloja na osnovu opterećenju dva prethodna reza $L_{i-1}^j(\alpha)$ i $L_{i-2}^j(\alpha)$

3. STRUKTURA I PARAMETRI NEURO-FAZI REGULATORA

Struktura neuro-fazi regulatora data je blok dijagramom na slici 3. Da bi se kompenzovalo moguće smanjenje kapaciteta kopanja u rezu sa nepovoljnim rasporedom slojeva sa velikim opterećenjem, uvedena je pozitivna povratna veza po srednjoj vrednosti predikcije \bar{P} , kojom se koriguje osnovna brzina kružnog kretanja V_0 na vrednost $V_b = V_0 \cdot (1 + k_b \cdot \bar{P})$. Neuralna mreža svojim izlazom određuje efektivnu predikciju opterećenja $P_w[\alpha(t)]$ (isprekidana linija na grafiku $P(\alpha)$ slika 2) koja se koristi za korekciju kosinusne reference $V_b^{ref}[\alpha(t)]$ prema relaciji $V_p^{ref}[\alpha(t)] = V_b^{ref}[\alpha(t)] \cdot \{1 - k_p \cdot P_w[\alpha(t)]\}$. Parametri k_b i k_p su podešeni na objektu i imaju vrednosti $k_b=0.1$ i $k_p=0.15$. U cilju eliminisanja negativnog efekta diskretizacije merenja ugla zakretanja, kao i poboljšanja karakteristika kopanja u fazi učenja neuralne mreže, uveden je adaptivni PI regulator. Ovaj regulator vrši fino podešavanje reference po struji radnog točka. Konačno definisana referenca određena je sa $V_k^{ref}[\alpha(t), t] = V_p^{ref}[\alpha(t)] \cdot [1 - k_a \cdot f_{bw}(t)]$ gde je $f_{bw}(t) = K_{bw} \cdot [e_{bw}(t) + 1/T_{bw} \int e_{bw}(t) dt]$. Parametri ovog regulatora su dobijeni na osnovu simulacija i eksperimenata, a njihove konačne vrednosti: $k_a=0.1$, $K_{bw}=65$, $T_{bw}=14.2$ s za $|I_{bw}(t) - I_{bwnom}| \leq 0.181 \cdot I_{bwnom}$ ili $k_a=0.1$, $K_{bw}=75$, $T_{bw}=7$ s za $|I_{bw}(t) - I_{bwnom}| > 0.181 \cdot I_{bwnom}$.

Na osnovu uspešne upravljačke akcije iskusnih operatera došlo se do sledećeg zaključka o veličini i brzini promene struje I_{bw} u zavisnosti od ugla zakretanja α . Dovoljno je za ovaj tip bagera pratiti struju I_{bw} u prethodna 4° i na osnovu njenog kolebanja odrediti ugao početka preventivnog korigovanja brzine V_k (što iskusni bageristi inače često čine). Ukoliko struja I_{bw} ima veća kolebanja bageristi počinju sa preventivnim korigovanjem brzine V_k već na uglovima koji

su do $3,5^\circ$ pre kritičnog ugla kada se vidi da će biti ili očekuje naglja promena opterećenja. U suprotnom, ako je struja I_{bw} mirnija, početak preventivnog korigovanja brzine V_k se odlaže za ugao koji je $1,5^\circ$ pre kritičnog ugla.

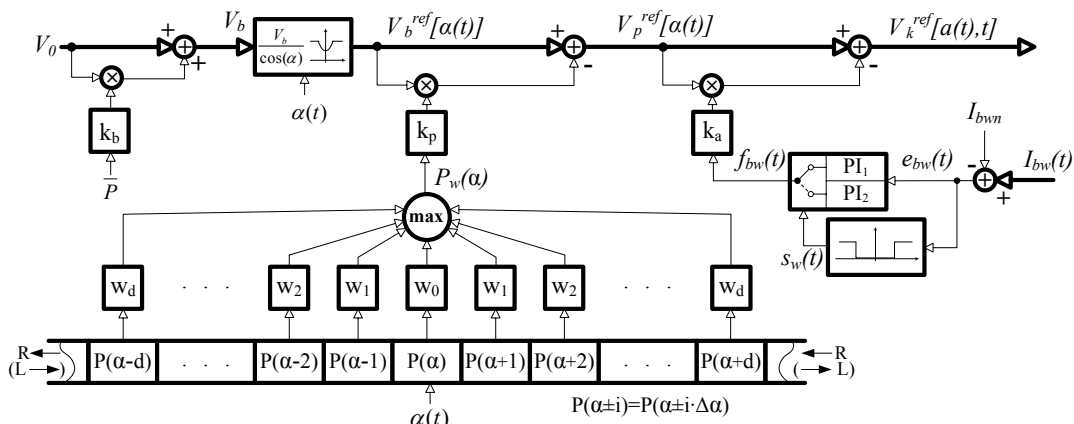
Ovo zapažanje je pretočeno u fazi pravilo adaptacije ugla preventivnog delovanja δ (ugla kada počinje korigovanje brzine V_k), uz to što je prošireno sa time da se, pored praćenja kolebanja opterećenja $L(\alpha)$ tokom prethodnih 4° , predviđa kolebanje predikcije $P(\alpha)$ narednih 4° tekućeg reza. Na osnovu ukupnog broja tačaka N_d diskontinuiteta opterećenja $L(\alpha)$ i predikcije $P(\alpha)$ u posmatranom opsegu uglova, određuje se srednja širina ugla kolebanja \bar{d}_α - relacija (4). Na osnovu srednje širine ugla kolebanja adaptacija ugla preventivnog delovanja δ određuje se preslikavanjem definisanim slikom 4.a.

$$\bar{d}_\alpha = \frac{(\alpha + 4^\circ) - (\alpha - 4^\circ)}{N_d + 1} = \frac{8^\circ}{N_d + 1} \quad (4)$$

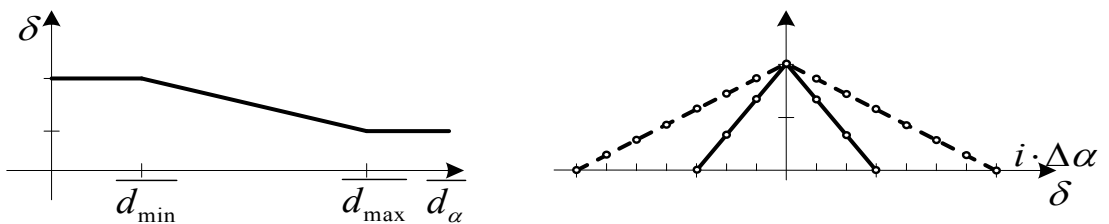
Na osnovu pomenutih i dodatnih eksperimenata na bageru sa ugrađenim regulatorom, vrednosti parametara ovog dela regulatora su: $\bar{d}_{\min} = 3^\circ$, $\bar{d}_{\max} = 7^\circ$, $D_{\min} = 1.5^\circ$, $D_{\max} = 3.5^\circ$.

Određivanje ugla preventivnog delovanja δ pruža mogućnost da se referenca kružnog kretanja u novom rezu $V_k^{ref} = V_k^{ref}[\alpha(t), t]$ [5] adaptira tako što veoma inertna superstruktura bagera blagovremeno prilagođava brzinu opterećenju. To se postiže promenom težinskih koeficijenata neuralne mreže po zakonu prikazanom na slici 4.b. Zbog svog efekta težinske vrednosti nose naziv težinske vrednosti preventivnog delovanja. Izlazni čvor je definisan funkcijom "maksimum" čime se adaptacija referenca kružnog kretanja ostvaruje uz najmanji rizik po superstrukturu.

Slikom 5 i slikom 6 ilustrovana je efiksnost razvijenog neuro-fazi regulatora, u jednom površinskom rezu sa

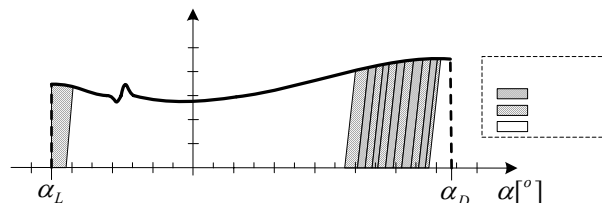


3. Blok dijagram neuro-fazi regulatora

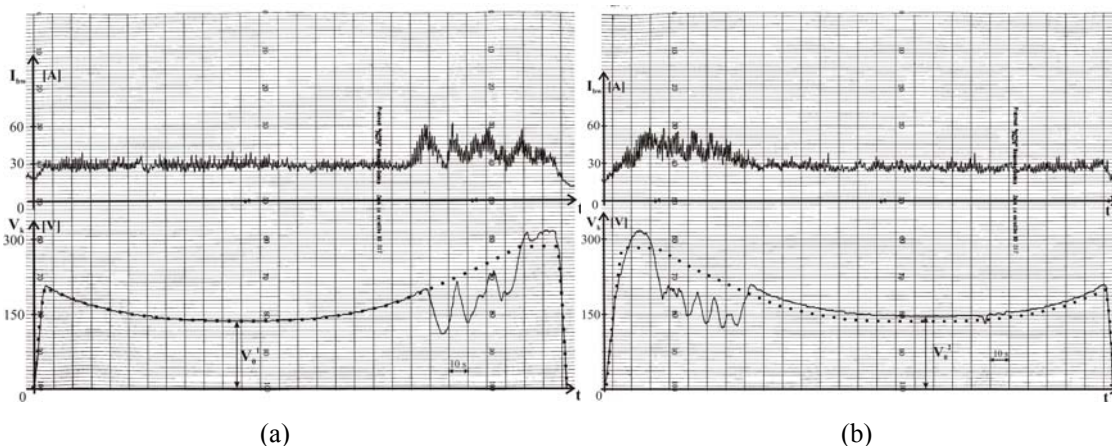


Sl. 4. Funkcije: a) adaptacije ugla preventivnog delovanja δ i b) težinskih vrednosti preventivnog delovanja w

velikom promenom visine i karakteristika materijala, definisanih saglasno [2]. Sa slike 6(b) vidi se efekat obučavanja: i struja I_{bw} i napon V_k su znatno mirniji, a u homogenom delu drugog reza brzina kružnog kretanja je povećana. Treba uočiti i reakciju neuro-fazi kontrolera na relativno malu varijaciju visine reza u homogenom delu, koja se može videti na slici 5 za ugao katarke $\alpha \approx -18^\circ$. Ovo pokazuje sa kojom tačnošću fazi preslikavanje definisano tabelom 1 odražava opterećenje reznih elemenata.



Sl. 5. Visina reza ΔH u površinskom sloju u kome su karakteristike materijala bile veoma različite



Sl. 6. Struja motora radnog točka (I_{bw}) i napon motora kružnog kretanja (V_k) u prvom rezu (a) i drugom rezu (b), dobijeni primenom razvijenog adaptivno-prediktivnog neuro-fazi kontrolera. Tehnološka ("kosinusna") referenca obeležena je tačkastom krivom.

4. ZAKLJUČAK

Neuro-fazi regulator realizovan je na jednom od bagera SRs-1200, zajedno sa senzorima kružnog i translatorskog kretanja, i u eksploataciji je pokazao visoke performanse. S obzirom na to i da se u Srbiji i Crnoj Gori oko 70% električne energije proizvodi primenom uglja sa površinskih kopova, poželjno bi bilo da se izloženi sistem upravljanja primeni i na ostalim bagerima. Ovo tim pre što se, s obzirom na starost kopova i objekata na njima, očekuje revitalizacija. Ne bi bilo dobro da se u procesu revitalizacije izmeni samo hardver, a da se upravljački algoritmi i dalje zasnivaju na standardnim-prevaziđenim konceptima.

LITERATURA

- [1] R.E. Danell and O. Mol, "Excavator Monitoring in Open Cut Mines", *Advances in Mining Equipment Performance Monitoring*, McGill University, Montreal, March 1990.
- [2] W. Durst, W. Vogt, "Bucket Wheel Excavator", *Trans Tech Publications, Series of Mining Engineering*, Vol. 7, pp. 85-91, 1988.
- [3] B. Jevtović, "Modeliranje i realizacija senzora i izvršnih organa i lokalnih regulatora sistema upravljanja bagerom glodarom SRs-1200", *Magistarski rad*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 1992.

- [4] B. Jevtović and M. Mataušek, "Modeling of Bucket Wheel Excavator: Theory and Experimental Results", *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Working and Living Environmental Protection*, Vol. 2.No 4, pp. 335-343, 2004.
- [5] B. Jevtović and M. Mataušek, "A Predictive-Adaptive Hierarchical Control System of Bucket-Wheel Excavator: Theory and Experimental Results", To appear in *FACTA UNIVERSITATIS*, 2005.

Abstract – In this paper a new concept of bucket wheel excavator control is presented. Adaptive-predictive controller based on a neuro-fuzzy concept is implemented successfully, enlarging considerably excavating capacity.

DESIGN AND TUNING OF THE BUCKET WHEEL EXCAVATOR NEURO-FUZZY CONTROLLER

Branislav Jevtović, Miroslav Mataušek