

Samoorganiziranje neizrazitog analitičkog regulatora pri vođenju mobilnog robota

**Marijo KIROLA¹⁾ i
Branko NOVAKOVIĆ²⁾**

- 1) Sveučilište u Dubrovniku
(University of Dubrovnik),
Ćira Carića 4, HR - 20000 Dubrovnik,
Republic of Croatia
- 2) Fakultet strojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Zagrebu (Faculty of Mechanical
Engineering and Naval Architecture of the
University of Zagreb),
Ivana Lučića 1, HR - 10000 Zagreb
Republic of Croatia

marijo.kirola@unidu.hr;
branko.novakovic@fsb.hr

Ključne riječi

*Autonomni mobilni robot
Funkcija pripadnosti
Neizraziti analitički regulator
Referentna putanja
Samoorganiziranje*

Keywords

*Autonomous Mobile Robot
Fuzzy analytic controller
Membership Function
Reference trajectory
Self-organizing*

Received (primljeno): 2008-02-13

Accepted (prihvaćeno): 2008-12-19

Izvornoznanstveni članak

Promjena postojeće strukture suvremenog neizrazitog analitičkog regulatora predlaže se u svrhu poboljšanja njegovih regulacijskih karakteristika. Isto tako predlaže se i automatski postupak samoorganiziranja njegovih slobodnih parametara u off-modu rada. Komparativni rezultati vođenja autonomnog mobilnog robota različitim oblicima putanja s implementiranim linearnim i neizrazitim analitičkim Proporcionalno-Derivacijskim PD – regulatorom prikazani su na kraju.

Self-organizing of Fuzzy Analytic Controller in Mobile Robot Path-Tracking Control

Original scientific paper

This paper proposes a modification of the existing analytic fuzzy controller which provides improvement of control performances. Also, a procedure for an automatic off-line parameter self-organization is proposed. Finally, the comparative simulation results of the mobile robot control with linear and analytic fuzzy PD controller on different path shapes are demonstrated.

1. Uvod

Primjena konvencionalne neizrazite upravljačke tehnike s većim brojem ulaznih i/ili izlaznih varijabli, ograničena je brojem korištenih neizrazitih pravila regulacije. Oni stvaraju bazu neizrazitih pravila regulacije [1-2], a njihov broj raste eksponencijalno s porastom broja varijabli. I bez dodatnih pojednostavljenja, njihova praktična primjena u vođenju tehničkih sustava u realnom vremenu strogo je ograničena na svega dvije do tri ulazne varijable [3-6]. Stoga se krajem 20. i početkom 21. stoljeća, s novim adaptivnim oblicima neizrazitih skupova [7] uvodi suvremeni analitički pristup neizrazitoj regulaciji [8-10].

Tim pristupom u procesu inferencije uvedena je analitička funkcija za preslikavanje ulaznih Neizrazitih Skupova (NS) u centre izlaznih NS, čime se direktno izbjegava formiranje baze neizrazitih pravila regulacije, a tim i eksponencijalni porast broja neizrazitih pravila regulacije s brojem ulaznih varijabli. Tako se povećava brzina projektiranja i rad Neizrazitog Analitičkog Regulatora (NAR-a), što omogućuje njegovu primjenu u praksi i to prvenstveno u slijednoj regulaciji pri vođenju nepokretnih i pokretnih robotskih sustava [9-11], regulacijskim krugovima alatnih strojeva i fleksibilnih proizvodnih sustava s velikim brojem ulaznih varijabli. Radovi iz tog područja [12-13], ukazuju na dobre strane ovakvog

Oznake/Symbols

C_E	- konstanta proporcionalnosti elektromotorne sile istosmjernog motora, V·s/rad - electrical constant of DC-motor	q, \dot{q}, \ddot{q}	- kutni pomak, brzina i ubrzanje pogonskih kotača, rad/s, rad/s ² - angle, angular velocity and angular acceleration of driving wheels
C_M	- momentna konstanta istosmjernog motora reducirana na izlazno vratilo reduktora, N·m/A - torque constant of DC-motor, reduced on output axis of mechanical reduction gears	\dot{q}_n	- nazivna brzina, rad/s - nominal velocity
D_M	- koeficijent viskoznog trenja rotora istosmjernog motora, N·m·s/rad - viscous coefficient of DC-motor rotor	ω	- analitička aktivacijska funkcija - analytic activation function
F_j	- slobodni parametar analitičke funkcije - free parametar of analytic function	\underline{x}_j	- normalizirana vrijednost ulazne varijable - normalized value of input variable
h_{ij}	- centrifugalni dinamički moment tromosti, kg·m ² - products of inertia	\underline{Y}_{cj}	- normalizirana analitička funkcija preslikavanja j -te ulazne varijable na poziciju centra izlaznog NS - normalized analytic function for mapping of input j -th variable to center position of output FS
h_{ii}	- aksijalni dinamički moment tromosti, kg·m ² - axial moment of inertia	α_θ	- zamah poopćenog slobodnog parametra - momentum of generalized free parameters
ISE	- integral kvadratne pogreške - Integral Square Error	β	- parametar raspodjele NS-a - distribution parameter of FS
J_m	- dinamički moment tromosti rotora istosmjernog motora, kg·m ² - moment of inertia Direct Current DC-motor	γ_1	- stupanj pripadnosti j -te ulazne varijable i -tom ulaznom NS - scaling factor of membership of j -th input variable to i -th input FS
K_{Fc}	- neizrazito pojačanje pozicije, V/rad - position fuzzy gain	γ_2	- stupanj djelovanja analitičke aktivacijske funkcije - degree of influence of analytic activation function
K_{Fde}	- neizrazito pojačanje brzine, V·s/rad - velocity fuzzy gain	γ_e, γ_{de}	- vrijednost pozicije centra izlaznih NS pogrešaka pozicije i brzine, V - value of center output FS position and velocity
K_I	- integralna vrijednost pojačanja, V/s - integral gain	ε	- adaptacijski parametar - adaptation parameter
K_{Pu}	- pojačanje naponskog pojačala snage, V/V - gain of power amplifier	η_θ	- poopćeni koeficijent obučavanja PNAR-a - generalized learning coefficient of IFAC
k_j	- faktor pojačanja j -tog izlaznog NS - gain factor of j -th output FS	Θ_θ	- osjetljivost neizrazite upravljačke varijable o θ parametru - sensitivity of fuzzy control variable on θ parameter
m	- masa istosmjernog motora, kg - mass of DC-motor	Θ_{ki}	- osjetljivost upravljačke varijable o integralnom pojačanju, s - sensitivity of control variable on integral gain
N	- prijenosni omjer reduktora - reduction ratio	θ	- osjetljivost poopćene upravljane varijable o integralnom pojačanju, s/V - sensitivity of generalized controlled variable on integral gain
P	- pojačanje predupravljanja - gain of feedforward action	ζ	- diskretna vrijednost varijable, 1 ili 0 - discrete value of variable
R	- omski otpor armaturnog namota istosmjernog motora, Ω - winding resistance of rotor DC-motor	$\vartheta_j^{(i)}$	- j -ti poopćeni parametar i -tog stupnja slobode gibanja - j -th generalized parameter of i -th degree of freedom of motion
$S(\underline{x}_j)$	- funkcija pripadnosti NS-a - FS membership function		
T	- baza neizrazitog skupa (NS) - fuzzy set base FS		
T_s	- vrijeme uzorkovanja signala, s - sampling period		
U_m	- maksimalna vrijednost upravljačke varijable, V - maximal value of control variable		
u_F	- neizrazita upravljačka varijabla, V - fuzzy control variable		

suvremenog analitičkog pristupa neizrazitoj regulaciji. Tako je za predloženu konstrukciju neholonomnog Autonomnog Mobilnog Robota (AMR-a) [14-15], za njegovo vođenje u prostoru vanjskih koordinata projektiran linearni i nelinearni zakon upravljanja [16-17], čiji dani komparativni rezultati [18], upućuju na prednost suvremenog analitičkog pristupa i u ovom području primjene. Iako je osnovna karakteristika takvog pristupa brzina rada i mogućnost primjene u realnom vremenu, ipak je u fazi projektiranja potrebno provesti znatno vrijeme u interakcijskom radu s elektroničkim računalom kako bi se odredile najprikladnije vrijednosti parametara aktivacijske i analitičke funkcije. Stoga je temeljni zadatak rada [19], da se promjenama postojeće strukture suvremenog analitičkog neizrazitog regulatora [7, 9-10], omogući primjena automatskog postupka samoorganiziranja slobodnih parametara u off-modu rada i tako smanji vrijeme njegova projektiranja. Razvoju takvog postupka, prethodilo je upoznavanje s postojećim metodama samoorganiziranja konvencionalnih neizrazitih regulatora [4-6, 20-23].

2. Struktura poboljšanog neizrazitog analitičkog regulatora

Isto kao i suvremeni neizraziti analitički regulator [7, 9-10] struktura Poboljšanog Neizrazitog Analitičkog Regulatora (PNAR-a) sastoji se od tri osnovna elementa:

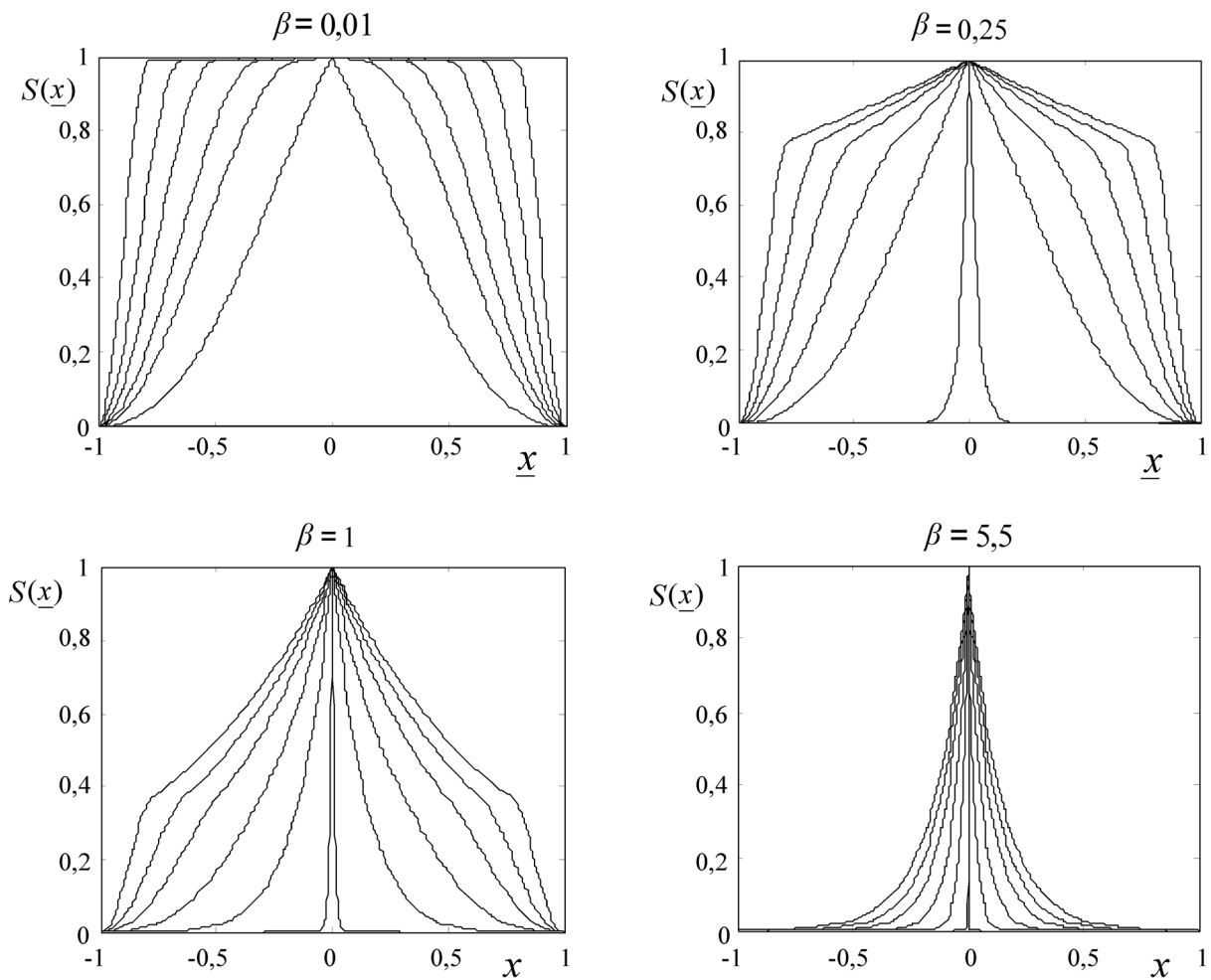
1. Decimalno-neizrazite (D/N) pretvorbe, (eng. *fuzzification*), koja se ostvaruje funkcijom pripadnosti u analitičkom obliku:

$$\text{za: } 0 \leq |x_j| < \frac{T_i}{2\varepsilon_i^j}, S(x_j) = \frac{1}{\exp(\beta_j \varepsilon_i^j |x_j|)}, \tag{1}$$

$$i=1,2,\dots,p, \quad j=1,2,\dots,m,$$

$$\text{za: } \frac{T_i}{2\varepsilon_i^j} \leq |x_j| \leq \frac{T_i}{2}, S(x_j) = S(x_j). \tag{2}$$

$$\left[1 - \cos \frac{2\pi \varepsilon_i^j \cdot ((x_j - x_{ci}) \operatorname{sgn}(x_j) + T_i / 2)}{T_i(\varepsilon_i^j - 1)} \right]$$



Slika 1. Grafički prikazi ε - β distribucije raščlanjenosti ulaznih NS, definiranih funkcijama pripadnosti (1 i 2)

Figure 1. Graphical representation of ε - β distribution of input FS which are defined by membership functions (1 i 2)

U odnosu na dosadašnji pristup ovdje se pri nultoj vrijednosti β parametra, interval potpune pripadnosti ulazne j -te varijable i -tom neizrazitom skupu, degenerira pri $\beta > 0$ u centroid dan skalarnom funkcijom pripadnosti (1). Pritom postoji potpuna pripadnost jedino kod nulte ulazne varijable, čime se postiže da je funkcija pripadnosti na ostalom području razmatranja ulazne varijable kontinuirana i glatka krivulja (slika 1) s jednoznačno definiranim vrijednostima viših derivacija.

To je čini vrlo pogodnom za primjenu linearnih i /ili nelinearnih postupaka samoorganiziranja slobodnih parametara PNAR-a, koji se baziraju na gradijentu njegovih ulaznih varijabli.

2. Procesu odlučivanja (eng. *inference*), koji je dan aktivacijskom funkcijom:

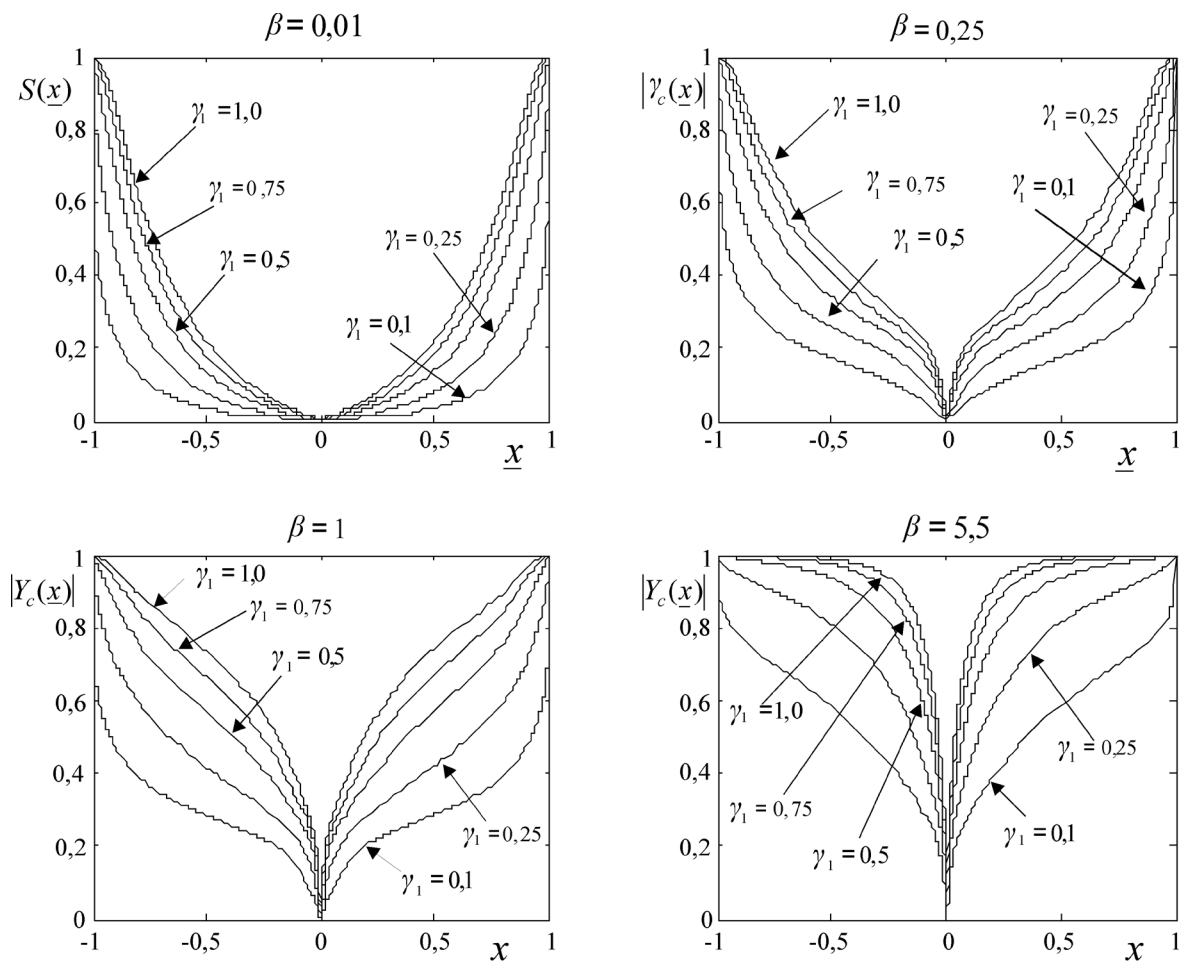
$$\omega_j = [\underline{S}_1^j(\underline{x}_j)]^{\gamma_1} + [\underline{S}_2^j(\underline{x}_j)]^{\gamma_1} + \dots + [\underline{S}_{p_j}^j(\underline{x}_j)]^{\gamma_1} = \sum_{i=1}^{p_j} [\underline{S}_i^j(\underline{x}_j)]^{\gamma_1} \quad (3)$$

i normaliziranom analitičkom funkcijom preslikavanja ulaznih NS u centre izlaznih NS u analitičkom obliku:

$$Y_{cj} = \left(1 + |\underline{x}_j|^{\alpha_j}\right) \cdot \left(1 - \frac{\omega_j}{p_j}\right) \cdot \text{sgn}(\underline{x}_j), \text{ uz } \alpha_j \geq 0. \quad (4)$$

Pritom parametar γ_j označava stupnjevanu pripadnost ulazne varijable i -tom neizrazitom skupu. Njegov utjecaj na formiranje karakteristične krivulje koju čine normalizirane vrijednosti pozicije centra izlaznih NS izračunate izrazom (4), prikazan je na slici 2. Iz slike je vidljivo da je pravilnim izborom parametra γ_j moguće realizirati upravljačku trajektoriju blisku dvopoložajnom regulatoru.

3. Neizrazito-decimalne (N/D) pretvorbe, (eng. *defuzzification*) koja u Normaliziranom Vremenski Diskretnom Koraku (NVDK) (n) definira izlaznu upravljačku varijablu u analitičkom obliku:



Slika 2. Apsolutne vrijednosti normaliziranih pozicija centra izlaznih NS $|Y_{cj}(x)|$, za ε - β distribuciju raščlanjenosti ulaznih NS (slika 1)

Figure 2. Absolute values of normalized positions of output FS centers $|Y_{cj}(x)|$, for ε - β distribution of input FS (Figure 1)

$$u_F(n+1) = \frac{\sum_{j=1}^m [\omega_j(n)]^{\gamma_2} y_{cj}(n) I_j}{\sum_{j=1}^m [\omega_j(n)]^{\gamma_2} I_j}, \text{ gdje je}$$

$$I_j = \frac{T_j \cdot (1+k_j)}{2}, \tag{5}$$

gdje je parametrom γ_2 koji se kreće u intervalu $0 < \gamma_2 \leq 1$, stupnjevana aktivacijska funkcija $\omega_j(n)$. Pri relativno malim vrijednostima stupnja djelovanja aktivacijske funkcije rezultat N/D pretvorbe može se približno predstaviti sumom

$$u_F(n+1) = \psi(e, \underline{de}, n) = \psi_e(e, n) + \psi_{de}(\underline{de}, n), \tag{6}$$

nelinearnih upravljačkih krivulja pozicije $\psi_e = Y_e$ i brzine $\psi_{de} = Y_{de}$ dobivenih normaliziranom analitičkom funkcijom preslikavanja (4),

$$Y_e(e, n) = U_m F_e \cdot \left(1 - \frac{\omega_e(n)}{P_e}\right) \cdot \text{sgn}(e), \tag{7}$$

$$Y_{de}(\underline{de}, n) = U_m F_{de} \cdot \left(1 - \frac{\omega_{de}(n)}{P_{de}}\right) \cdot \text{sgn}(\underline{de}).$$

Uvođenjem novih oblika funkcija pripadnosti (1 i 2) i aktivacijske funkcije (3) osigurana je veća raspoloživost karakterističnog područja djelovanja NAR-a (slika 3), gdje pritom vrijedi tvrdnja da se pravilnim izborom F , β i γ_1 parametra može realizirati upravljačka trajektorija bilo kojeg oblika. Parametri ulaznih i izlaznih neizrazitih skupova, koji sudjeluju u realizaciji PD-PNAR-a, prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovni parametri a) ulaznih i b) izlaznih neizrazitih skupova suvremenog neizrazitog analitičkog regulatora

Table 1. Basic parameters of a) input and b) output fuzzy sets of improved analytic fuzzy controller

a)

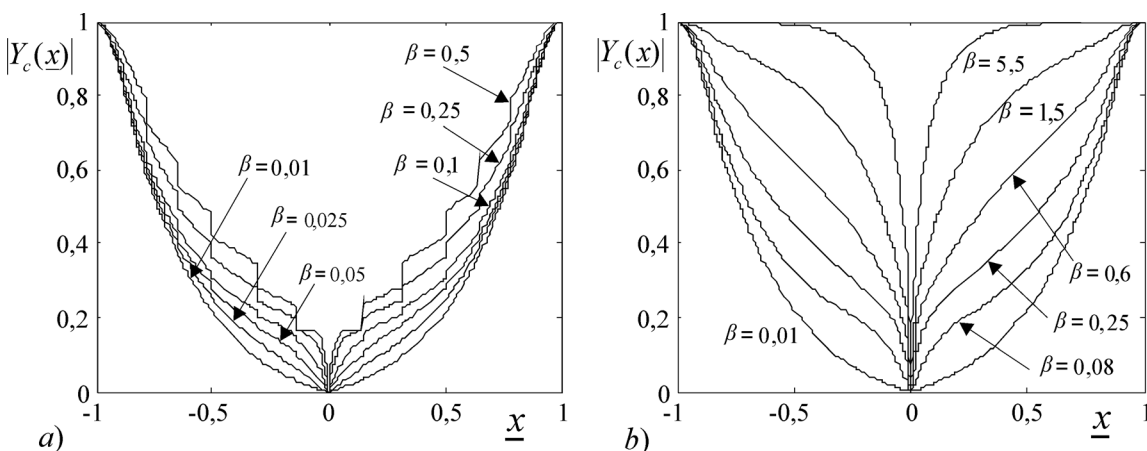
Broj NS / No. FS p_i	Parametar ulaznog NS / Parameter of input FS ε_i	Baza ulaznog NS / Base of input FS	Centar ulaznog NS / Center of input FS
1	17	2,05	0,0
2	17,2	2,05	0,0
3	19	2,05	0,0
4	21	2,05	0,0
5	31	2,05	0,0
6	65	2,05	0,0
7	122	2,05	0,0

b)

Parametri / Parameters	1. rotacijskog stupnja / 1 st rotational degree	2. rotacijskog stupnja / 2 nd rotational degree
T_e, T_{de}	0,5	0,5
α_e, α_{de}	0	0
k_e, k_{de}	0,75	0,75
$\gamma_{1e}, \gamma_{1de}$	0,96	0,96
$\gamma_{2e}, \gamma_{2de}$	0,03	0,03

3. Postupak samoorganiziranja PID-PNAR-a

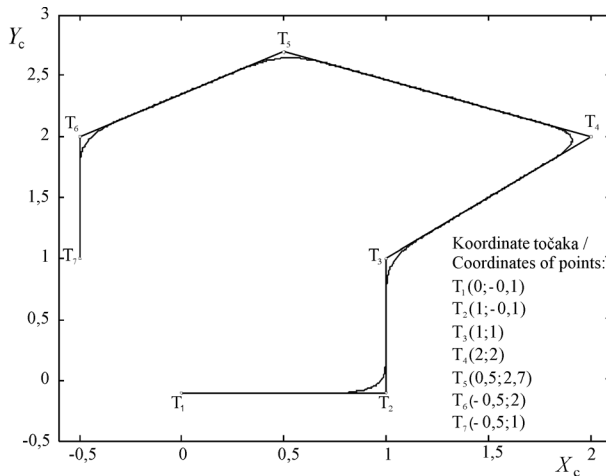
Za odabranu trajektoriju složenijeg oblika zadanu segmentima koje određuju točke T_1, T_2, \dots, T_7 ; generira



Slika 3. Prikaz karakterističnog područja djelovanja NAR-a, za različite vrijednosti parametra β , a) dosadašnjim analitičkim pristupom i b) poboljšanim suvremenim analitičkim pristupom (1-3)

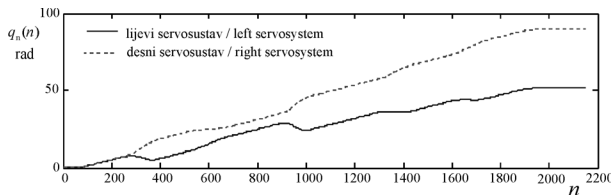
Figure 3. Representation of characteristic area of FAC acting for different values of parameter β , with a) existing analytic approach and b) improved analytic approach (1-3)

se neprekidna referentna trajektorija u prostoru vanjskih koordinata (slika 4), neprekidnom nominalnom trajektorijom iz prostora unutarnjih koordinata (slika 5), koja uz primijenjen kvadratni zakon promjene ubrzanja prilikom prelaska s jednog segmenta trajektorije na drugi [24], ostvaruje ravnomjerno gibanje AMR-a u prostoru vanjskih koordinata [19].



Slika 4. Na osnovi odabranih segmenata određenih točkama T_1, T_2, \dots, T_7 ; prikaz neprekidne zadane trajektorije gibanja AMR-a u prostoru vanjskih koordinata

Figure 4. Representation of continuous referent trajectory of AMR on the base of chosen segments defined by points T_1, T_2, \dots, T_7 ; in task space



Slika 5. Generirana nominalna trajektorija u prostoru unutarnjih koordinata, uslijed gibanja AMR-a konstantnom brzinom 0,4 m/s referentnom putanjom (slika 4)

Figure 5. Generated nominal trajectory in joint space due to AMR motion with constant velocity 0,4 m/s along referent trajectory (Figure 4)

Vođenje AMR-a vrši se u prostoru unutarnjih upravljanih koordinata upravljačkom varijablom i -tog servosustava danom diferencijalnom jednačzbon

$$(u_r)_i = \frac{(J_m N^2 + h_{ii})R}{C_M K_{Pu}} \ddot{q}_i + \left(\frac{C_E}{K_{Pu}} + \frac{D_m N^2 R}{C_M K_{Pu}} \right) \dot{q}_i + \frac{h_{ij} R}{C_M K_{Pu}} \ddot{q}_j, \quad i \neq j, \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

Parametri istosmjernih motora i mehanički parametri mehanizma mobilnog robota svedeni na izlazno vratilo

reduktora, poznati su i dani u tablici 2. Potrebna nominalna vrijednost upravljačkog napona za stacionarno gibanje AMR-a linearnim dijelovima putanje (slika 4) dobiva se iz (8)

$$(u_r)_n = \left(C_E + \frac{D_m N^2 R}{C_M} \right) \frac{\dot{q}_n}{K_{Pu}}. \quad (9)$$

Krajem 20. stoljeća, intenzivno se radi na samoorganiziranju [6, 20-21] i ugađanju [25-26] klasičnih neizrazitih regulatora. Kako se tu uglavnom radi o nepoznatom modelu procesa, veći dio tih radova zasniva se na referentnom modelu [4-5, 22-23, 27] s mogućnošću uključivanja elemenata umjetne inteligencije [28-30].

Tablica 2. Parametri dinamičkog sustava AMR-a

Table 2. Parameters of AMR dynamical systems

Aktuator br. / Actuator No.		1	2
h_{ii}	Aksijalni moment tromosti / Axial moment of inertia (kg·m ²)	0,24	0,24
h_{ij}	Centrifugalni moment tromosti / Products of inertia (kg·m ²)	0,081	0,081
$J_m N^2$	Moment inercije rotora / Moment of inertia of rotor (kg·m ²)	0,13	0,13
C_M	Momentna konstanta / Mechanical constant (N·m/A)	3,2	3,2
C_E	Naponska konstanta DC motora / Electrical constant of DC-motor (V·s/rad)	3,2	3,2
R	Otpor armature / Rotor resistance (Ω)	1,6	1,6
$D_m N^2$	Koeficijent viskoznosti / Viscous coefficient (N·m·s)	0,43	0,43
U_m	Maksimalna vrijednost upravljačke varijable / Maximal value of control variable (V)	15	15
\dot{q}_n	Nazivna brzina / Nominal velocity (rad/s)	28	28
N	Odnos redukcije / Reduction ratio	10	10
m	Masa / Mass (kg)	3,5	3,5
K_{Pu}	Pojačanje naponskog pojačala snage / Gain of power amplifier (V/V)	6	6

Postupak samoorganiziranja slobodnih F i β parametara PNAR-a započinje njegovim početnim ugađanjem u off-modu rada. Pritom se početne nulte vrijednosti slobodnih F i β parametara skokovito mijenjaju do svoje konačne vrijednosti, određene predloženim algoritmom početnog podešavanja PNAR-a. Daljnji postupak samoorganiziranja j -tog slobodnog parametra $\vartheta_j^{(i)}$ ($j=1,2,3$); PID-PNAR-a (i)-tog rotacijskog stupnja slobode gibanja, bazira se na gradijentu izlazne pogreške pozicije ($k=1$) i brzine ($k=2$), te se u diskretnom području prikazuje u svom konačnom nešto sažetijem obliku:

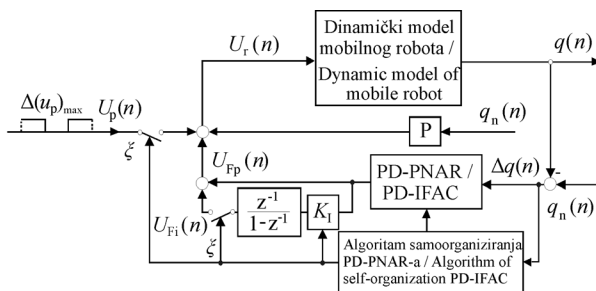
$$\Delta \vartheta_j^{(i)}(n) = -\eta_{\vartheta_{jk}}^{(i)} \Theta_{\vartheta_{jk}}^{(i)} \Delta q_k^{(i)}(n) \xi + \alpha_{\vartheta_{jk}}^{(i)} \Delta \vartheta_j^{(i)}(n-1) \xi + \theta^{-1(i)}(n^*) \Delta e^{*(i)}(n^*) (1-\xi), \quad (10)$$

gdje uvedene oznake $\eta_{\vartheta_{jk}}^{(i)}, \Theta_{\vartheta_{jk}}^{(i)}, \alpha_{\vartheta_{jk}}^{(i)}$ označavaju redom koeficijent učenja, funkciju osjetljivosti upravljačke varijable i zamah poopćenog slobodnog parametra, a $\theta^{-1(i)}$ označava inverznu funkciju osjetljivosti izlazne varijable o integralnom pojačanju. Za vrijednost diskretne varijable ($\xi=1$) predloženim nelinearnim algoritmom u off-modu rada, započinje adaptacija F i β parametara, pri čemu se neizrazita upravljačka ploha $u_r = \psi(e, de, F, \beta, n)$ po NVDK-a (n), fino oblikuje s izraženim nelinearnim djelovanjem. Kada se diskretna vrijednost integrala kvadratne pogreške pozicije *ISE* (eng. *Integral Square Error*)

$$ISE_e = \sum_{n=1}^N (\Delta q_1)^2 T_S, \quad (11)$$

koji se računa na kraju svake iteracije po iznosu nađe ispod unaprijed zadane vrijednosti $ISE < ISE_{zad}$, dolazi do promjene diskretne vrijednosti varijable ($\xi=0$), što rezultira uvođenjem jedne od predloženih PID struktura samoorganiziranja slobodnih parametara s integracijskim djelovanjem [5, 21-23, 31]. Pritom upravljačka varijabla strukture samoorganiziranja s integracijskim djelovanjem po izlazu PD-PNAR-a (slika 6) iznosi:

$$u_r(n+1) = u_{FI}(n)(1-\xi) + K_1 \Psi(e, de, n)(1-\xi) + \Psi(e, de, n+1) + P q_n \xi, \quad (12)$$

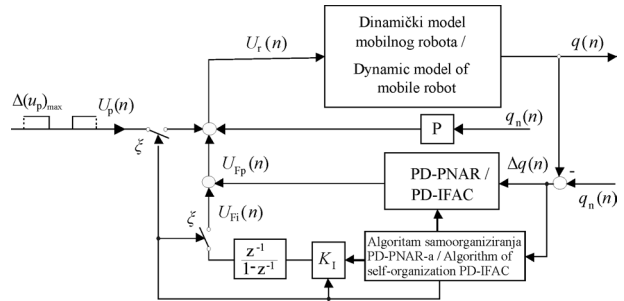


Slika 6. Struktura samoorganiziranja PID-PNAR-a, s integracijskim djelovanjem njegova izlaza

Figure 6. Self-organization structure of PID-IFAC with output integral action

dok je na slici 7 prikazana struktura samoorganiziranja s integracijskim djelovanjem po izlaznoj pogrešci pozicije, kod koje za upravljačku varijablu vrijedi

$$u_r(n+1) = u_{FI}(n)(1-\xi) + K_1 e(n)(1-\xi) + \Psi(e, de, n+1) + P q_n \xi. \quad (13)$$



Slika 7. Struktura samoorganiziranja PID-PNAR-a, s integracijskim djelovanjem po izlaznoj pogrešci pozicije

Figure 7. Self-organization structure of PID-IFAC with integral action regarding to output position error

Kako bi se preostala pogreška PD-PNAR-a i/ili uključeni emulirani procijenjeni poremećaj stacionarnog stanja sveo u granice dozvoljenih iznosa, vrši se na kraju podešavanje integralne vrijednosti pojačanja K_1 [22-23]. Time se dodatno oblikuje neizrazita upravljačka površina, čime je proces samoorganiziranja slobodnih parametara PNAR-a u off-modu rada završen.

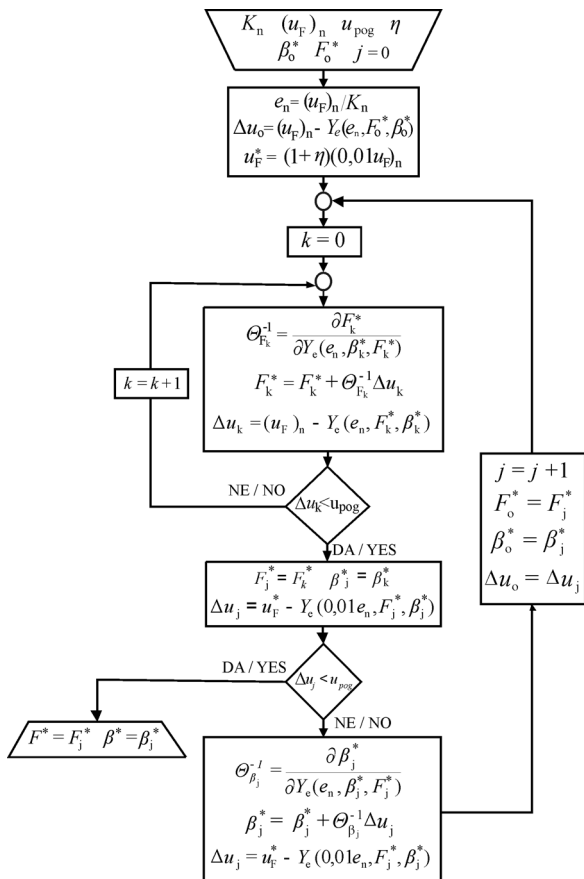
3.1. Početno podešavanje PNAR-a

Postupak početnog podešavanja PNAR-a podrazumijeva dovođenje upravljačke karakteristične površine $u_r = \psi(e, de, F, \beta)$ u početni položaj, odnosno u stanje minimalne pobuđenosti, sa svojstvima bliskim linearnom PD-regulatoru. U tom slučaju stupanj neizrazitog djelovanja regulatora ima približno nultu vrijednost. Pri čemu za sve vrijednosti pogreške pozicije $e \in \{e_{min}, \dots, e_{max}\}$ i $de \in \{de_{min}, \dots, de_{max}\}$ brzine vrijedi da je osjetljivost upravljačke varijable po položaju i brzini približno jednaka vrijednostima statičkog pojačanja

$$\begin{aligned} \Theta_e &= \frac{\partial \psi(e, de, F, \beta)}{\partial e} \approx K_{Fe} \approx const, \\ \Theta_{de} &= \frac{\partial \psi(e, de, F, \beta)}{\partial de} \approx K_{Fde} \approx const. \end{aligned} \quad (14)$$

Tada i dinamičke vrijednosti pojačanja po položaju i brzini približno su jednake svojim statičkim vrijednostima. Projektiranjem linearnog PD-regulatora, podešavanjem polova dolazi se do pojačanja koji su po vrijednosti jednaki statičkim vrijednostima pojačanja po položaju $K_{np}=10$ i brzini $K_{nv}=6$. Za izračunatu nominalnu vrijednost upravljačkog napona izrazom (9) i vrijednosti statičkih pojačanja, algoritmom početnog podešavanja PNAR-a prikazanog blok dijagramom na slici 8, za unaprijed određenu dopuštenu pogrešku korištene metode tangenti (u_{pog}), dobivaju se konačne vrijednosti slobodnih parametara:

$$F_e=0,487, \beta_e=0,0329, F_{de}=0,282, \beta_{de}=0,0341. \quad (15)$$



Slika 8. Blok dijagram algoritma za početno podešavanje PNAR-a

Figure 8. Block-diagram for initial tuning of IFAC

3.2. Nelinearna fina adaptacija slobodnih F i beta parametara

Za vrijednost diskretne varijable ($\zeta = 1$) i slobodne parametre $\vartheta_1^{(i)} = F_k^{(i)}, \vartheta_2^{(i)} = \beta_k^{(i)}$ i-tog stupnja slobode

gibanja iz (10) dolazi se do nelinearnog algoritma fine adaptacije F i beta parametra [19], zasnovanom na gradijentu k-te ulazne varijable

$$F_k^{(i)}(n+1) = F_k^{(i)}(n) - \eta_{Fk}^{(i)} \Theta_{Fk}^{(i)} \Delta q_k^{(i)}(n) + \alpha_{Fk}^{(i)} \Delta F_k^{(i)}(n-1), \tag{16}$$

$$\beta_k^{(i)}(n+1) = \beta_k^{(i)}(n) - \eta_{\beta k}^{(i)} \Theta_{\beta k}^{(i)} \Delta q_k^{(i)}(n) + \alpha_{\beta k}^{(i)} \Delta \beta_k^{(i)}(n-1), i, k=1,2. \tag{17}$$

Time se poslije početnog ugađanja PNAR-a, po NVDK (n) nastavlja započeti proces samoorganiziranja slobodnih parametara u off-modu rada. Koeficijent učenja η_F mijenja se na kraju svake iteracije po zakonitosti

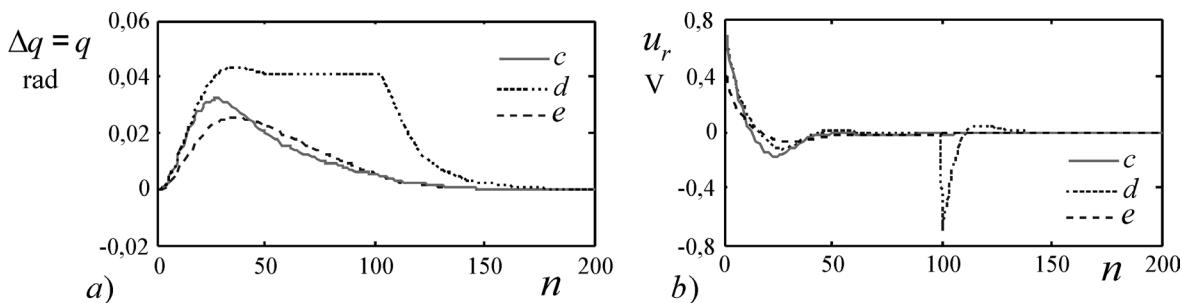
$$\eta_F = A_F e^{\sigma_F \frac{ISE_F - ISE}{ISE_F}}, \tag{18}$$

dok se koeficijent učenja $\beta(n)$ mijenja u svakom NVDK (n) po izrazu

$$\eta_\beta(n) = -\beta^2(n) \frac{\partial \beta(n)}{\partial F(n)} A_\beta e^{\sigma_\beta \frac{ISE_\beta - ISE}{ISE_\beta}}. \tag{19}$$

U procesu adaptacije kao referenca uzima se gibanje mobilnog robota po NVDK uzorkovanja ($T_s=0,01$ s) referentnom putanjom složenijeg oblika (slika 4) u prostoru unutarnjih upravljanih koordinata (slika 5). Pritom postignuta pozicija i brzina na kraju jedne reference predstavlja početni uvjet pozicije i brzine za sljedeću referencu, sve dok se izračunata vrijednost kriterija zaustavljanja procesa adaptacije dana izrazom (11) ne svede unutar zadane vrijednosti 0,033.

Parametri prikazani u tablici 3 odabiru se s obzirom na dva međusobno oprečna zahtjeva, brzine procesa adaptacije i blizine procesa adaptacije granici stabilnosti. Npr. pri većim odabranim vrijednostima koeficijenata



Slika 9. a) Dijagrami ostvarene trajektorije poremećaja, b) upravljačke varijable, zbog djelovanja vanjskog konstantnog nemjerljivog poremećaja na početku podešavanja PD-PNAR-a (d), na završetku podešavanja integralne vrijednosti pojačanja predložene strukture samoorganiziranja na slici 6 (c) i one na slici 7 (e)

Figure 9. a) Diagrams of realized disturbance trajectory, b) control variable, due to outside constant unmeasurable disturbance at the beginning of PD-IFAC tuning process (d), at the end of integral gain tuning of the proposed structure of self-organization in the Figures 6 (c) and 7 (e)

obučavanja A_F i A_β brzina adaptacije će biti veća, ali će zato algoritam adaptacije biti bliži granici stabilnosti [19, 32-34]. Proces adaptacije početnih slobodnih parametara (15), započinje s parametrima adaptacije danim u tablici 3, a zaustavlja se nakon 67 promjena reference u oba smjera s konačno dobivenim iznosima parametara

$$F_e=23, \beta_e=0,0007, F_{de}=20, \beta_{de}=0,0072. \quad (20)$$

Tablica 3. Osnovni parametri adaptacije početno ugođenog PD-PNAR-a

Table 3. Basic adaptation parameters of initially tuned PD-IFAC

Parametri / Parameters	e	de	Parametri / Parameters	e	de
σ_F	8	2	ISE_F	0,09	0,81
σ_β	8	2	ISE_β	0,09	0,81
A_F	0,16	0,14	α_F	0,5	0,1
A_β	0,67	0,97	α_β	0,5	0,1

3.3. Podešavanje integralne vrijednosti pojačanja

Kada postupkom fine adaptacije F i β parametra (16 i 17), diskretna vrijednost integrala kvadratne pogreške izračunate izrazom (11) padne ispod zadane vrijednosti, nultom vrijednosti diskretne varijable ζ uključuje se integracijsko djelovanje jedne od predloženih struktura (slika 6 ili 7) s početnim nultim iznosom integracijskog pojačanja ($K_I=0$). Pritom se uključuje nulto nominalno upravljanje i emulacija vanjskog nemjerljivog poremećaja od strane upravljačke varijable impulsnim pravokutnim signalima svake sekunde u procijenjenom konstantnom maksimalnom iznosu od $\Delta(u_{p,max})=0,7$ V. Kako bi se preostala stacionarna pogreška na kraju n -te iteracije u posljednjem n^* tom koraku svela unutar zadane vrijednosti $\Delta e_{max}^* = -\Delta q_{max}$, iz (10) pri $\vartheta_3^{(i)} = K_I^{(i)}$ dolazi se do konačnog izraza [22-23], za podešavanja integralne vrijednosti pojačanja PID-PNAR-a (i)-tog rotacijskog stupnja slobode gibanja

$$K_I^{(i)}(n+1) = K_I^{(i)}(n) + \theta^{-1(i)}(n^*) \Delta e^{*(i)}(n^*) \quad (21)$$

U tom izrazu $\theta(n^*)$ označava osjetljivost poopcene varijable o integralnoj vrijednosti pojačanja,

$$\theta(n+1) = \frac{\partial q(n+1)}{\partial K_I} = \frac{\partial q(n+1)}{\partial u_r(n+1)} \Theta_{KI}(n+1), \quad (22)$$

gdje osjetljivost upravljačke varijable o integralnoj vrijednosti pojačanja $\Theta_{KI}(n+1)$, prikazane strukture samoorganiziranja na slici 6 slijedi iz

$$\Theta_{KI}(n+1) = \Theta_{KI}(n) + \Psi(e, de, n), \quad (23)$$

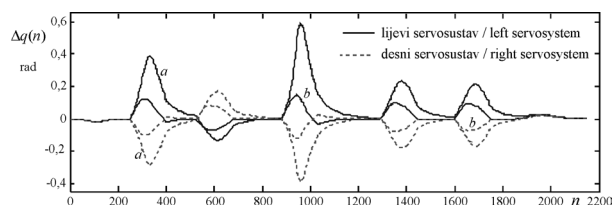
a iz predložene strukture prikazane na slici 7 ona se dobiva izrazom

$$\Theta_{KI}(n+1) = \Theta_{KI}(n) + e(n) \quad (24)$$

Uzimajući da je dopuštena učinjena vrijednost stacionarne pogreške upravljane varijable unutar zadane vrijednosti $\Delta q_{max} = -0,005$, strukturom samoorganiziranja na slici 6 potrebno je 57 iteracija da bi se izrazom (21) došlo do integralne vrijednosti pojačanja $K_I=3,35$, dok je predloženom strukturom samoorganiziranja prikazanom na slici 7 uz nešto sporije iščezavanje pogreške s integralnom vrijednosti pojačanja $K_I=27,25$ potrebno 19 iteracija. Dijagrami ostvarene trajektorije poremećaja i upravljačke veličine prikazani su na slici 9. Nešto složenije metode bazirane na referentnom modelu i funkcijama osjetljivosti razvijene su u radovima [5, 22-23], gdje se podešavanje integralne vrijednosti pojačanja vrši u on-modu rada, kada stacionarna vrijednost pogreške poraste izvan dopuštenog iznosa $|\Delta q_{max}|$.

4. Rezultati simulacije vođenja mobilnog robota

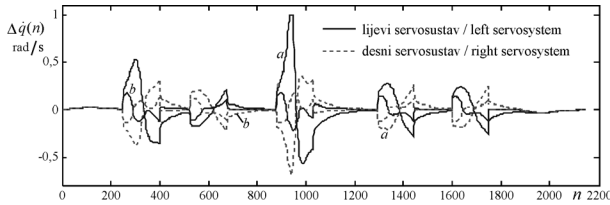
Rezultati izloženog postupka samoorganiziranja slobodnih parametara PID-PNAR-a, testirani su simulacijom gibanja AMR-a referentnom putanjom (slika 4), prikazanom nominalnom trajektorijom u prostoru unutarnjih upravljanih koordinata na slici 5.



Slika 10. Pogreška pozicije pogonskih kotača pri vođenju AMR-a, a) na početku i b) na kraju procesa adaptiranja parametara PD-PNAR-a

Figure 10. AMR driving wheels position error, a) on beginning and b) at the end of PD-IFAC parameter adaptation process

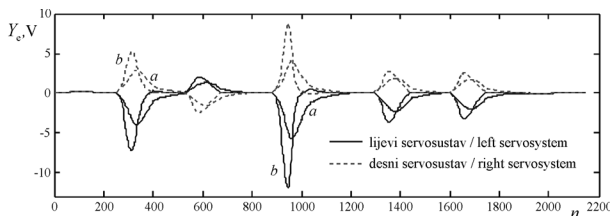
Na prikazanim dijagramima na slici 10 i 11 uočava se da je procesom adaptacije parametara maksimalna vrijednost pogreške pozicije i brzine servosustava lijevog i desnog pogonskog kotača smanjena približno šest puta. Većim kutevima skretanja AMR-a referentnom trajektorijom (slika 4) odgovaraju i veće vrijednosti pogreške.



Slika 11. Pogriješka brzine pogonskih kotača pri vođenju AMR-a, a) na početku i b) na kraju procesa adaptiranja parametara PD-PNAR-a

Figure 11. AMR driving wheels velocity error, a) on beginning and b) at the end of PD-IFAC parameter adaptation process

Dijagramima na slici 12 i 13 pokazano je da svako odstupanje pozicije i brzine od nominalne vrijednosti dovodi do promjene položaja centra izlaznih neizrazitih skupova Y_e i Y_{de} od njihove početne nulte vrijednosti.

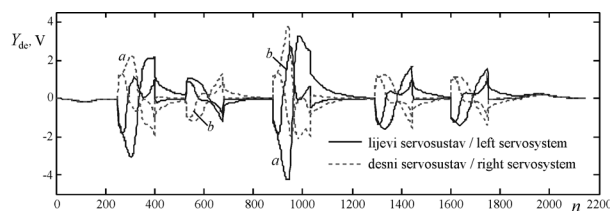


Slika 12. Središta izlaznih NS-a pogriješke pozicije Y_e pogonskih kotača pri vođenju AMR-a, a) na početku i b) na kraju procesa adaptiranja slobodnih parametara PD-PNAR-a

Figure 12. Centers of output FS for position error Y_e of AMR driving wheels, a) on beginning and b) at the end of PD-IFAC parameter adaptation process

Pritom pozitivnim prirastima izlaze pogriješke pozicije i brzine odgovara negativan prirast pozicije centra izlaznog NS

$$\text{sgn}(Y_e) = -\text{sgn}(\Delta q), \quad \text{sgn}(Y_{de}) = -\text{sgn}(\Delta \dot{q}). \quad (25)$$

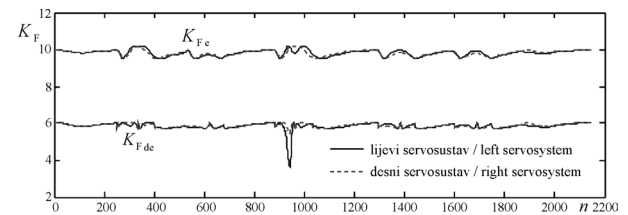


Slika 13. Središta izlaznih NS-a pogriješke brzine Y_{de} pogonskih kotača pri vođenju AMR-a, a) na početku i b) na kraju procesa adaptiranja slobodnih parametara PD-PNAR-a

Figure 13. Centers of output FS for velocity error Y_{de} of AMR driving wheels, a) on beginning and b) at the end of PD-IFAC parameter adaptation process

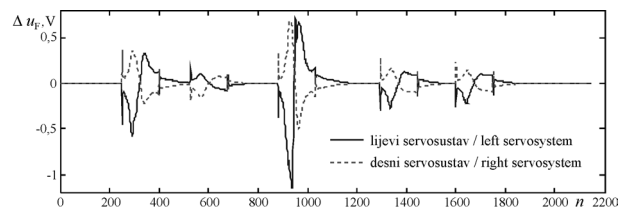
Na kraju početnog ugađanja PD-PNAR-a, dijagrami neizrazite vrijednosti pojačanja pozicije K_{Fe} i brzine K_{Fde}

prikazani su na slici 14. Završenim procesom adaptacije formiran je prirast neizrazite upravljačke varijable po NVDK-a (slika 15), koja dovodi PD-PNAR u stanje maksimalne pobudenosti. Najveći stupanj neizrazitog djelovanja PD-PNAR-a, primjećuje se kroz neizrazite vrijednosti pojačanja (slike 16 i 17), koje se u odnosu na početnu vrijednost i vrijednosti izlaze pogriješke povećavaju gotovo osam puta.



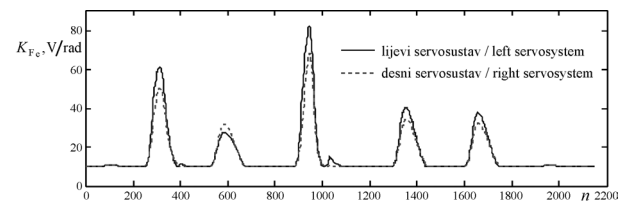
Slika 14. Neizrazite vrijednosti pojačanja pozicije K_{Fe} (V/rad) i brzine K_{Fde} (V·s/rad) početno ugođenog PD-PNAR-a pri vođenju AMR-a referentnom putanjom

Figure 14. Fuzzy values of position gains K_{Fe} (V/rad) and velocity gains K_{Fde} (V·s/rad) for initially tuned PD-IFAC for AMR reference trajectory tracking



Slika 15. Prirast neizrazite upravljačke varijable $\Delta u_F(n)$ pri vođenju AMR-a referentnom putanjom (slika 4 i 5) u odnosu na početno ugođeni PD-PNAR

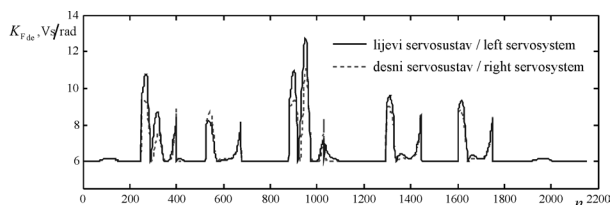
Figure 15. Fuzzy control variable increment $\Delta u_F(n)$ for AMR reference trajectory tracking regarding to initially tuned PD-IFAC



Slika 16. Neizrazite vrijednosti pojačanja pozicije na kraju adaptacije slobodnih parametara PD-PNAR-a pri vođenju AMR-a referentnom putanjom.

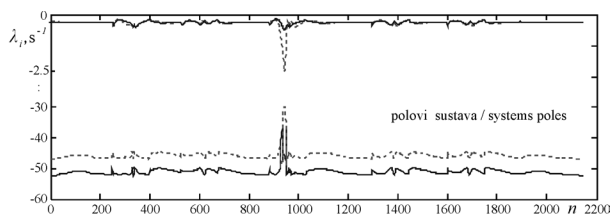
Figure 16. Fuzzy values of position gains at the end of adaptation of PD-IFAC free parameters for AMR reference trajectory tracking.

Pri prijelazu AMR-a s jednog segmenta na drugi zadane trajektorije (slika 4), povećavaju se neizrazite vrijednosti pojačanja pozicije i brzine, kao što je to prikazano dijagramima na slici 16 i 17.



Slika 17. Neizrazite vrijednosti pojačanja brzine na kraju adaptacije slobodnih parametara PD-PNAR-a pri vođenju AMR-a referentnom putanjom

Figure 17. Fuzzy values of velocity gains at the end of adaptation of free parameters PD- IFAC for AMR reference trajectory tracking



Slika 18. Promjena polova dinamičkog sustava početno ugodenog PD-PNAR-a pri vođenju AMR-a zadanom referentnom putanjom

Figure 18. Changes of dynamical systems poles of initially tuned PD-IFAC for AMR reference trajectory tracking

Posljedica povećanja neizrazitih vrijednosti pojačanja (slika 16 i 17), je prirast pozicije centra izlaznog NS-a (slika 12 i 13), što rezultira smanjenjem pogreške po položaju i brzini (slika 10 i 11).

Pritom u uvjetima zatvorenih regulacijskih petlji pozicije i brzine dolazi do pomicanja polova dinamičkog sustava više u lijevu stranu *S*-ravnine. Stoga dijagramski prikaz polova na početku i kraju procesa adaptacije parametara PD-PNAR-a prikazan je po NVDK-a na slici 18 i 19.

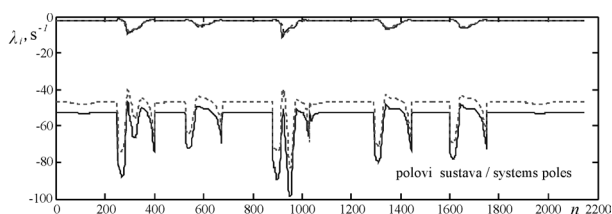
5. Usporedno proučavanje PD-PNAR-a sa klasičnim linearnim PD-regulatorom

Na nivou *i*-tog stupnja slobode gibanja upravljačkom varijablom:

$$(u_r)_i = -K_{pi}\Delta q_i - K_{vi}\Delta \dot{q}_i + P_i(q_n)_i, i=1,2. \quad (26)$$

definiran je linearni PD-zakon upravljanja s odabranim pojačanjem P_i predupravljanja s ciljem eliminiranja vrijednosti statičke pogreške. U radovima [22-23] pokazano je kako se i pojačanje predupravljanja može automatski podešavati i uključiti u sam postupak samoorganiziranja parametara. Iz izraza (12 ili 13) pri diskretnoj vrijednosti varijable ($\zeta=1$) predloženih struktura samoorganiziranja prikazanih na slici 6 i 7 dolazi se do upravljačke varijable PD-PNAR-a

$$(u_r)_i = \Psi_i(e, de, F, \beta) + P_i(q_n)_i, i=1,2. \quad (27)$$



Slika 19. Promjena polova dinamičkog sustava na kraju procesa adaptacije slobodnih parametara PD-PNAR-a pri vođenju AMR-a zadanom referentnom putanjom

Figure 19. Changes of dynamical systems poles at the end of adaptation process of PD- IFAC free parameters for AMR reference trajectory tracking

Za odabrane različite putanje u prostoru vanjskih koordinata, vođenje AMR-a ostvaruje se predloženim zakonima upravljanja (26 i 27) u prostoru unutarnjih koordinata. Pritom se kvaliteta vođenja s različitim implementiranim zakonima upravljanja uspoređuje na osnovi izračunate *ISE* vrijednosti pogreške pozicije i brzine.

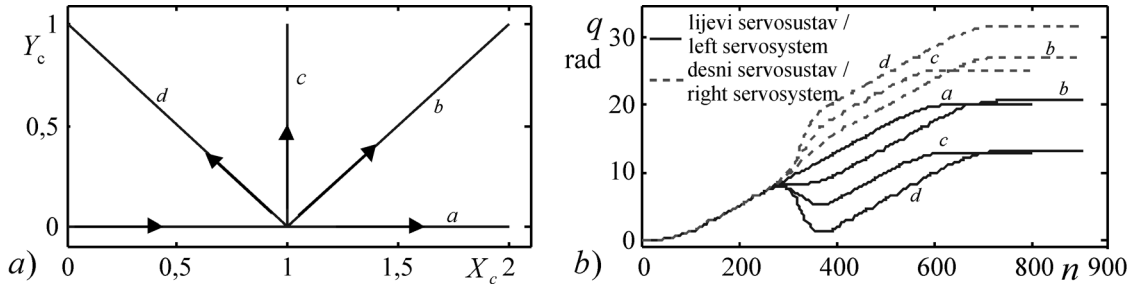
Korištenjem izraza (11), rezultati za usporedbu dani su u tablici 4.

Za ostvarivanje većih kutova skretanja zadanom trajektorijom potreban je veći prirast neizrazite upravljačke varijable, što je prikazano i dijagramima na slici 21.

Tablica 4. Vrijednosti ISE, pri vođenju AMR-a različitim zadanim putanjama sa slike 20 i s implementiranim zakonima upravljanja (26 i 27)

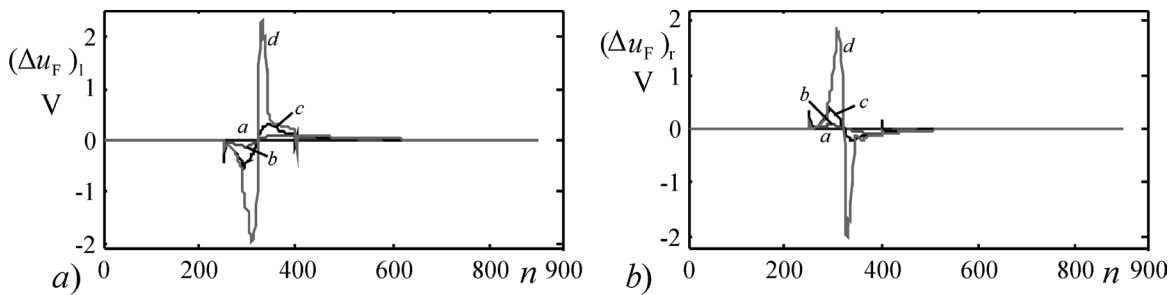
Table 4. The ISE values for different AMR reference trajectory tracking from the Figure 20 and with implemented control laws (26 i 27)

Trajektorija / Trajectory	Klasični linearni PD - regulator / Klassical linear PD - controller				PD - PNAR / PD - IFAC			
	a	b	c	d	a	b	c	d
$(ISE_{c})_1$	0,000648	0,0211	0,1005	0,2866	0,000622	0,005	0,0095	0,0169
$(ISE_{c})_d$	0,000648	0,0158	0,0570	0,1447	0,000622	0,0046	0,0077	0,0122
$(ISE_{dc})_1$	0,0016	0,3097	0,6719	1,2825	0,0016	0,0085	0,0166	0,0686
$(ISE_{dc})_d$	0,0016	0,2639	0,4947	0,9583	0,0016	0,0069	0,0117	0,0513



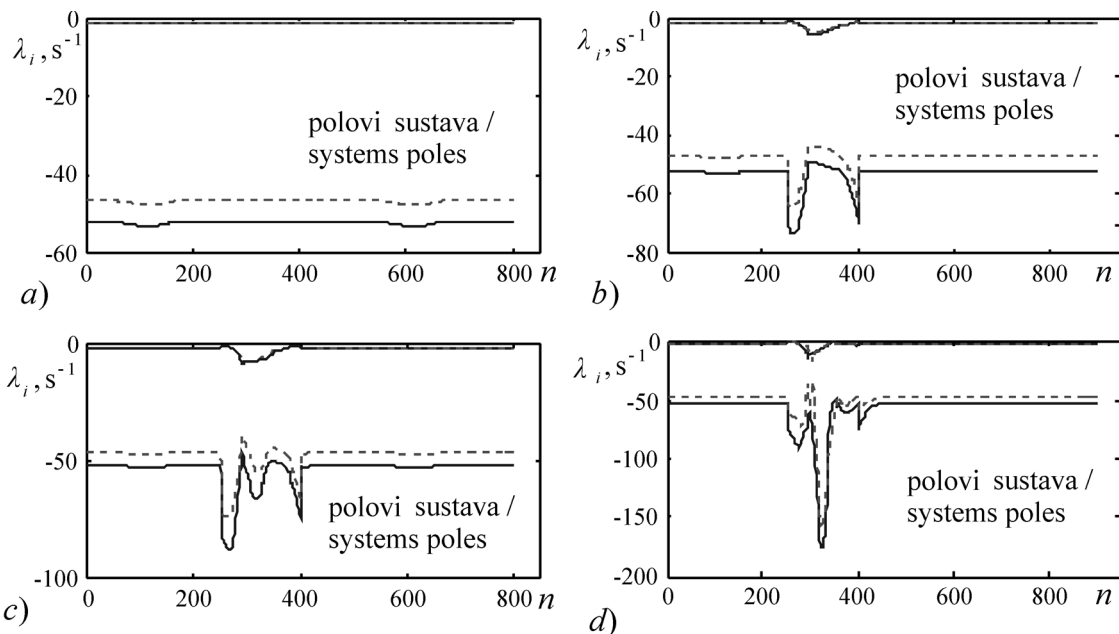
Slika 20. Ostvarene nominalne trajektorije u prostoru unutarnjih upravljanih koordinata b), pri gibanja AMR-a zadanom putanjom u vanjskim koordinatama a)

Figure 20. Nominal trajectories in joint space of controlled coordinates b) for AMR reference trajectory tracking in task space a)



Slika 21. Prirast neizrazite upravljačke varijable Δu_F a) lijevog i b) desnog servomotora pri vođenju AMR-a različitim zadanim putanjama (a,b,c i d) sa slike 20

Figure 21. Fuzzy control variable increment Δu_F of a) left and b) right servo-motor for different AMR reference trajectory tracking regarding (a,b,c i d) from figure 20



Slika 22. Promjena polova u uvjetima zatvorenih regulacijskih petlji po poziciji i brzini PD-PNAR-a, pri vođenju AMR-a različitim zadanim putanjama a) (-a), b) (-b), c) (-c) i d) (-d), sa slike 20

Figure 22. Changes of systems poles for closed loop regarding to PD-IFAC position and velocity for different AMR reference trajectory tracking a) (-a), b) (-b), c) (-c) i d) (-d), from Figure 20

Tako povećani iznosi upravljačke varijable posljedica su povećanih vrijednosti neizrazitih pojačanja. Ovisno o kutu skretanja i polovi dinamičkog sustava AMR-a s implementiranim linearnim PD-zakonom upravljanja

$$\lambda_1 = -52,0076, \lambda_2 = -46,6095, \lambda_3 = -1,8932 \text{ i } \lambda_4 = -1,9012,$$

u uvjetima zatvorene regulacijske petlje po poziciji i brzini PD-PNAR-a pomiču se više ulijevo u S -ravnini, kako je to prikazano dijagramima na slici 22.

6. Zaključak

Uvođenjem novog oblika funkcije pripadnosti ulaznih NS (1 i 2), kao i stupnjevane aktivacijske funkcije sa stupnjevanom pripadnošću ulazne varijable i -tom NS-u (3), omogućeno je uvođenje automatskog postupka samoorganiziranja slobodnih parametara PID-PNAR-a. U daljnjem bi istraživanju imalo smisla razmatrati samoorganiziranje PNAR-a s više ulaznih varijabli, ali u ovom radu je sa stajališta problematike slijednog vođenja mobilnog robota, bilo dovoljno razmatrati samoorganiziranje PNAR-a sa samo dvije ulazne varijable. Isto tako u daljnjem istraživanju moguća je i integracija PNAR-a s nekim elementima umjetne inteligencije, kao što su neuronske mreže [28-30], genetski algoritmi itd. Predloženim postupkom početnog ugađanja PD-PNAR-a (slika 8) i primjenom rekurzivnog algoritma nelinearne adaptacije F i β parametara danog izrazima (16 i 17), znatno je skraćeno potrebno vrijeme projektiranja NAR-a. Dijagramski prikazi simulacije vođenja AMR-a različitim oblicima zadane nominalne trajektorije u prostoru unutarnjih upravljanih koordinata upućuju na opravdanost zamjene klasičnog linearnog zakona upravljanja (26) sa suvremenim PNAR-om (27), čija osnovna prednost je u boljoj kvaliteti slijedne regulacije.

LITERATURA

- [1] KOSKO, B.: *Fuzzy Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [2] PROCYK, T.J.; MAMDANI, E.H.: *A Linguistic Self-Organizing Process Controller*, Automatica, 15, (1979), 15-30.
- [3] SHAO, S.: *Fuzzy Self-Organizing Controller and its Application for Dynamic Processes*, Fuzzy sets and systems, 26, (1988), 151-164.
- [4] LAYNE, J.R.; PASSINO, K.M.: *Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering*, IEEE Control Systems Magazine, (1993), 23-34.
- [5] KOVAČIĆ, Z.; BOGDAN, S.; BALENOVIĆ, M.: *A Model Reference & Sensitivity Model-based Self-learning Fuzzy Logic Controller as a Solution for Control of Nonlinear Servo Systems*, The IEEE Transactions on Energy Conversion, 13, 4 (1999), 1479-1484.
- [6] KOVAČIĆ, Z.; BOGDAN, S.; REICHENBACH, T.: *Nonlinear position control by using multiple position dependent self-organizing fuzzy logic controllers*, 6th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO'00, Vienna, Austria, (2000), 229-233.
- [7] NOVAKOVIĆ, B.: *An Approach to Design of an Adaptive Fuzzy Set for Fuzzy Control*, Proceedings of the 6th International DAAAM Symposium, Technical University of Krakow, Poland, (1995), 243-244.
- [8] NOVAKOVIĆ, B.: *Fuzzy Logic Robot control Synthesis Without Any Rule Base*, Proceedings of the 8th IEEE, International Conference On Advanced Robotics, ICAR'97, 97TH8308, Monterey, California, U.S.A., (1997), 141-146.
- [9] NOVAKOVIĆ, B.: *Adaptive Fuzzy Logic Control Synthesis without a Fuzzy Rule Base*, Fuzzy Theory Systems: Techniques and Application, Academic Press, New York, 2, (1999), 781-808.
- [10] NOVAKOVIĆ, B.: *Fuzzy Logic Control Synthesis Without Any Rule Base*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 29, 3 (1999), 459-466.
- [11] NOVAKOVIĆ, B.; VRANJEŠ, B.; KASAČ, J.; MAJETIĆ, D.; BREZAK, D.: *An Adaptive Fuzzy Robot Control Without a Fuzzy Rule Base*, Proceedings of 15th IFAC World Congress on Automatic Control, Barcelona, Spain, 2002.
- [12] NOVAKOVIĆ, B.; MAJETIĆ, D.; BLAŽIĆEVIĆ, N.: *An Analytic Approach to Fuzzy Logic Robot Control Synthesis*, Symposium on Robot Control, Nantes, 2, (1997), 391-396.
- [13] NOVAKOVIĆ, B.; ŠČAP, D.; NOVAKOVIĆ, D.: *An Analytic Approach to Fuzzy Robot Control Synthesis*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 13, (2000), 71-83.
- [14] KIROLA, M.: *Projektiranje upravljačkog sustava mobilnog robota*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1995.
- [15] CRNEKOVIĆ, M.; KIROLA, M.: *Path Tracking Control Algorithm for Autonomous Mobile Robot*, Proceedings of the 4th International Conference on Production Engineering, CIM 1997, Opatija, Croatia.
- [16] KIROLA, M.: *Sinteza neizrazitog regulatora za mobilni robot*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [17] KIROLA, M.: *Fuzzy logic control (FLC) for autonomous mobile robot*, Proceedings of the 13th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, (2002), 263-264.
- [18] KIROLA, M.: *Comparative study of controllers for autonomous mobile robot*, Proceedings of the 15th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, (2004), 211-212.

- [19] KIROLA, M.: *Samoorganiziranje neizrazitog analitičkog regulatora pri vođenju mobilnog robota*, disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [20] WU, Z.Q.; WANG, P.Z.; HENG T.H.; SONG, S.S.: *A rule self-regulating fuzzy controller*, Fuzzy sets and systems, 47, (1992), 13-21.
- [21] KOVAČIĆ, Z.; BALENOVIĆ, M.; BOGDAN S.: *Sensitivity-based Self-learning Fuzzy Logic Control for a Servo System*, The IEEE Control Systems Magazine, 18, 3 (1998), 41-51.
- [22] KOVAČIĆ, Z.; BOGDAN S.; BALENOVIĆ M.: *Robustness Improvement of a Model Reference & Sensitivity Model-based Self-learning Fuzzy Logic Controller*, Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications CCA 98, Trieste, (1998), 643-647.
- [23] KOVAČIĆ, Z.; BOGDAN, S.: *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*, CRC Press, 2006.
- [24] NOVAKOVIĆ, B.: *Metode vođenja tehničkih sistema*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [25] BERENJI, H.R.; KHEDKAR P.: *Learning and Tuning Fuzzy Logic Controllers through Reinforcements*, IEEE Trans. Neural Networks, 3, (1992), 724-740.
- [26] GÜROCAK, H.B.; DE SAN LAZARO, A.: *A fine tuning method for fuzzy rule bases*, Fuzzy sets and systems, 67, (1994), 147-161.
- [27] KWONG, W.A.; PASSINO K.M.: *Dynamically Focused Fuzzy Learning Control*, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 26, 1 (1996), 53-74.
- [28] CHANG, H.-C.; WANG, M.-H.: *Neural Network-Based Self-Organizing Fuzzy Controller for Transient Stability of Multimachine Power Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 10, 2 (1995), 339-347.
- [29] KASABOV, N.K.: *Learning fuzzy rules and approximate reasoning in fuzzy neural networks and hybrid systems*, Fuzzy Sets and Systems, 82, (1996), 135-139.
- [30] KOVAČIĆ, Z.; PETIK, V.; REICHENBACH, T.; BOGDAN, S.: *Robust Self-Learning Fuzzy Logic Servo Control with Neural Network-Based Load Compensator*, CD-ROM Proceedings of The 3rd IMACS/IEEE International Conference on Circuits, Systems Communications and Computers, Athens, 1999.
- [31] BOGDAN, S.; KOVAČIĆ, Z.: *On the Design of a Self-learning Fuzzy Controllers for Nonlinear Control Systems by Using a Reference Model and a Sensitivity Model*, Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation, Chania, (1996), 799-804.
- [32] WANG, L.X.: *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*, Prentice Hall, 1994.
- [33] CHANG, H.-C.; WANG, M.-H.: *Neural Network-Based Self-Organizing Fuzzy Controller for Transient Stability of Multimachine Power Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 10, 2 (1995), 339-347.
- [34] KOVAČIĆ, Z.; BOGDAN, S.; CRNOSIJA P.: *Design and Stability of Self-Organizing Fuzzy Control of High-Order Systems*, Proceedings of the 10th IEEE ISIC, Monterey, (1995), 389-394.