

elektrotehnika

ZNANSTVENO-STRUČNI ČASOPIS
SAVEZA ELEKTROTEHNIČKIH
INŽENJERA I TEHNIČARA HRVATSKE
I UDRUŽENIH IZDAVACA

SUIZDAVAČI I IZDAVAČKI SAVJET:

Suizdavači časopisa ELEKTROTEHNIKA su zainteresirane radne, obrazovne, stručne, društvene i druge organizacije koje sklope ugovor o suizdavaštvu.

Izdavački savjet časopisa ELEKTROTEHNIKA čine delegati suizdavača (njihova imena navedena su iza naziva suizdavačkih organizacija):

- Elektroinštitut »Milan Vidmar«, Inštitut za elektriško gospodarstvo in elektroindustrijo, Ljubljana (Franc Zlahtič)
- Elektrotehnički fakultet Zagreb (Stanko Tonković)
- Elektrotehnički fakultet Sarajevo (Ejup Hot)
- Elektrotehničko društvo Zagreb (Neven Srb)
- Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split (Stanko Milun)
- HPT Zagreb (Vlasta Zurić-Hudek)
- HTV Zagreb, Odašiljači i veze, Zagreb (Vladimir Roboz)
- SEITH Zagreb (Ante Gobov)
- Ministarstvo znanosti, informatike i tehnologije Republike Hrvatske, Zagreb
- »Nikola Tesla«, Poduzeće za proizvodnju telekomunikacijskih sistema i uređaja, Zagreb (Juraj Salopek)
- Hrvatska elektroprivreda, Zagreb (Slavica Barta-Koštrun)

Predsjednik Izdavačkog savjeta:

Mr Vladimir Roboz, dipl. inž.

Glavni i odgovorni urednik:

Mr Stjepan A. Szabó, dipl. inž.

Metrološka obrada:

Zvonimir Jakobović, dipl. inž.

Jezičko-gramatička obrada:

Jelena Knežević, dipl. prof.

Likovno-grafička priprema:

Bruno Oslaković

Osnivač i izdavač: Savez elektrotehničkih inženjera i tehničara Hrvatske

Uredništvo: Berislavićeva 6/I, 41000 Zagreb
tel. (041) 422-943

Žiro-račun: 30102-678-4535

Izlazi šest puta godišnje, a po potrebi i češće

Uređuje urednički odbor

Tisak:

Grafički zavod Hrvatske
Radnička cesta Đ. Đakovića 210
Zagreb

Časopis izlazi uz financijsku potporu
Ministarstva znanosti, informatike
i tehnologije Republike Hrvatske

per
tim

g r

u
lon

tila

(P

je ki
reni čl
slanak

148,
ELEKTROTEHNIKA 33(1990)6
UDK 621.3 + 654 + 681.3(05:)»54—02«=862
ISSN 0013—5844

Godina (Volume) 34(1991)

Broj (No)

Stranice (Pages) 111—184

3-4

ZAGREB

svibanj—kolovoz
May—August

1991

U ovom broju:

- | | | |
|---|---|-----|
| M. Ožegović: | Automatsko ispitivanje na zaključivanje petlji u EES-u (OSP) | 113 |
| B. Jajac,
Ž. Torlak, | | |
| V. Srzentić: | Mogućnost ostvarenja ciklusa automatskoga ponovnog uklopa sinhronog generatora pri trolinom kratkom spoju (OSP) | 119 |
| S. Gotovac: | Metode za određivanje varijabli stanja asinhronog motora i postupci za njihovu provedbu (OSP) | 125 |
| J. Vuletin,
I. Zulim,
N. Sikimić,
P. Kulišić,
J. Škare: | Primjena funkcije korisnosti u procjenjivanju karakterističnih veličina fotnaoponskog sustava (PP) | 133 |
| I. Zulim: | Rezultati simulacije fotnaoponskog sustava verificirani pomoću funkcije korisnosti (OSP) | 137 |
| V. Roje,
I. Zanchi: | Utjecaj dimenzija linearnog dipola proizvoljnoga antenskog niza na međumpedanciju (OSP) | 145 |
| D. Stipaničev: | Diskretno vođenje složenih sustava adaptivnim nelinearnim PID-regulatorima (OSP) | 153 |
| A. Jadrić,
P. Slapničar,
H. Bilić,
I. Boljat,
Z. Grbac, | | |
| D. Marković: | Uzročni mehanizmi i eks taristi sustavi druge generacije — pretraživanje, opiziranje i samoučenje (PP) | 163 |
| N. Godinović,
Lj. Kulišić,
M. Josipović,
J. Škare: | Stabiliziranje visokotonaopona Van de Graaffovog akceleratora FESB-a Splitu na temelju automatskog reguliranja napaja posipanja (OSP) | 169 |
| I. Sorić, | | |
| J. Tudorić-Ghemo: | Funkcija odziva scincijskog detektora pri detekciji kočnog zračenja (P) | 175 |

NAPOMENA: Kratice u člancima uzimaju raticom iza naslova. Značenje kratice je slijedeće: OSP — Izvoran znanstvanak, PC — Prethodno priopćenje, R — Pregledni članak, PP — Stručni čl, CP — Izlaganje sa savjetovanja

Diskretno vođenje složenih sustava adaptivnim nelinearnim PID-regulatorima

D. STIPANIČEV
FESB, Split
FESB, Split, Croatia

Izvoran znanstveni članak
Original scientific paper
UDK 621.398:62.001

Ključne riječi:

Diskretno vođenje
Neizraziti skupovi
Nelinearno vođenje
PID-regulator
Rezultati istraživanja
Složeni sustavi

Key words:

Digital control
Fuzzy-sets
Nonlinear control
PID regulators
Simulation results
Complex systems

Analizirana su svojstva i predložen postupak ugadanja i projektiranja adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora temeljenog na teoriji neizrazitih skupova. Regulator je posebno pogodan za vođenje nelinearnih procesa nepoznatoga matematičkog modela. Rad regulatora ilustriran je rezultatima simulacijskih istraživanja.

DIGITAL CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS BY ADAPTIVE NONLINEAR PID CONTROLLERS

Adaptive nonlinear PID controllers based on fuzzy set theory are analyzed and a new method for their tuning and design is proposed. The controller is particularly suitable for nonlinear ill-defined processes. The results of the simulation illustrate proposed methods.

1. UVOD

U prvoj polovici XX. stoljeća otkrićem PID (proporcionalno, integracijsko, derivacijskih) regulatora dolazi do naglog razvoja teorije automatskog vođenja, koja se u to vrijeme ujedno i postavlja kao nova generalna teorija. Slijedeći veći pomak javlja se 60-ih godina uvođenjem tzv. moderne teorije vođenja, čijem razvoju je najviše pridonio paralelni razvoj tehnologije elektroničkih računala.

Međutim, kategorije vođenja uvedene u to vrijeme kao npr. optimalno vođenje, adaptivno vođenje i sl., iako su teorijski bile dobro razrađene, nisu naišle na toliko široku praktičnu primjenu kako se očekivalo. Osnovni problem sastojao se u tome što se većina tih metoda zasnivala na matematičkom modelu sustava kojeg je potrebno voditi. U slučajevima kada matematički model zadovoljavajuće opisuje ponašanje vođenog sustava, moderna teorija vođenja daje izuzetno dobre rezultate. Međutim, do dobrog i primjenljivoga matematičkog modela dosta je teško doći, pa praksa vođenja obično izgleda potpuno drugačije, i može se svesti na dva osnovna pristupa.

Jednostavniji sustavi vode se klasičnim (analognim

ili digitalnim) PID-regulatorima, koji se uglavnom ugadaju heurističkim pravilima, bez poznavanja matematičkog modela, najviše zato što se matematički model kod takvih sustava ne isplati razvijati. S druge strane, za brojne složene sustave matematički model se ili ne može postaviti ili, ako se postavi, nije praktičan za korištenje pri razvoju algoritama vođenja. To se posebno odnosi na razne industrijske procese. Zbog toga takvi sustavi još uvijek zahtijevaju aktivnu ulogu procesnog operatora, posebno obučenog radnika koji sudjeluje i u direktnom postupku vođenja i pri nadzoru jednostavnih automatskih regulatora u pojedinim regulacijskim petljama.

Dakle, praksa vođenja nastoji, koliko je god to moguće, riješiti zadatak vođenja bez razvoja i postavljanja matematičkog modela vođenog procesa. Upravo zbog toga su se u posljednjim dekadama pojavili neki novi, alternativni pristupi automatskom vođenju, koji ne zahtijevaju poznavanje matematičkog modela i uglavnom se zasnivaju na metodama i postupcima preuzetim iz teorije umjetne inteligencije. Posebno je zanimljiv pristup, koji je u posljednjih nekoliko godina doživio pravi procvat, i to naročito u oblasti praktične primjene vođenja složenih sustava, temeljen na Zadehovoju teoriji neizrazitih (eng. fuzzy) skupova [1, 2, 3].

Radi se, u stvari, o širokoj klasi diskretnih, digitalnih,

nelinearnih regulatora, koji, po svojoj strukturi, imaju dosta sličnosti s klasičnim PI, PD ili PID-regulatorima, ali, istovremeno, imaju i brojne osobine ekspertnih sustava. Nelinearna svojstva dobiju se na temelju heurističkog protokola vođenja, koji, na neki način, oponaša postupke iskusnoga procesnog operatora. Upravo zahvaljujući tim nelinearnim karakteristikama, regulatori pokazuju izuzetnu uspješnost pri vođenju brojnih složenih sustava, zato što su i sami sustavi, u osnovi, nelinearni.

U početku protokol vođenja se i dobivao od procesnih operatora raznim metodama prikupljanja znanja, međutim to se pokazalo kao najteži i najnepouzdaniji dio razvoja algoritma vođenja. Da bi se izbjegao postupak prikupljanja znanja, pojavile su se ideje [4] da se baza znanja formira automatski, da regulator postane adaptivan, te da ima svojstvo prilagodbe i sposobnost samostalnog formiranja protokola vođenja. Istraživanja su se posebno intenzivirala posljednjih nekoliko godina [5, 6].

Ovaj rad opisuje nov, originalan pristup projektiranju i ugadanju takvog regulatora. Razrađeni postupak zasniva se na regulatoru koji, po svojoj strukturi, ima sličnosti s diskretnim PID-regulatorom, ali uz to ima i svojstvo adaptivnosti, te se može samoorganizirati i prilagoditi promjenama vođenog sustava. Data je i usporedba s uobičajenim adaptivnim vođenjem, te su naglašene sličnosti i razlike tih dvaju, po ideji sličnih, ali po svojstvima i realizaciji različitih načina vođenja složenih sustava. Djelotvornost regulatora ilustrirana je rezultatima simulacije vođenja nekoliko različitih sustava. Kako se matematički opis regulatora temelji na Zadehovoju teoriji neizrazitih skupova, čitaoca koji se prvi put susreće s ovim pojmovima može se uputiti na Prilog koji, u kratkim crtama, daje osnovne ideje ove teorije.

2. NELINEARNI PID-REGULATORI

Djelovanje klasičnoga kontinuiranog PID-regulatora najčešće se opisuje jednadžbom:

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (1)$$

gdje su e i u pogreška i upravljanje, odnosno ulazna i izlazna varijabla regulatora, a K_p , T_i i T_d uobičajeno proporcionalno pojačanje, te integracijska i derivacijska vremenska konstanta. Digitalna implementacija PID-regulatora obično se temelji na inkrementalnom diskretnom obliku regulatora, do kojeg se dolazi deriviranjem i diskretizacijom jednadžbe (1):

$$u_n = u_{n-1} + du \quad (2)$$

$$du = K_p \left[\frac{T}{T_i} e_n + \Delta e_n + \frac{T_d}{T} \Delta^2 e_n \right] \quad (3)$$

T je integral uzimanja uzoraka, $\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$ prirast pogreške, a $\Delta^2 e_n = \Delta e_n - \Delta e_{n-1} = e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}$ porast prirasta pogreške. Shematski PID-regulator može se prikazati sl. 1. Svojstva regulatora određena su konstantama K_p , T_i i T_d .

U radnom području, unutar dopuštenih vrijednosti promjene upravljačke varijable, regulator karakterizira svojstvo linearnosti. Promjena upravljanja linearno ovisi o pogreški, promjeni pogreške i promjeni promjene pogreške.

Nelinearni PID-regulator ima strukturu sličnu klasičnom PID-regulatoru, s tim što se promjena upravljanja ne formira superpozicijom ulaznih signala regulatora (e , Δe i $\Delta^2 e$), već posebnim postupkom izbora odgovarajuće promjene upravljanja. Shematski nelinearni PID-regulator može se prikazati sl. 2.

GE, GCE, GCCE i GU su odgovarajuća pojačanja ulaznih i izlaznih varijabli pomoću kojih se grubo podešavaju karakteristike regulatora, o čemu će kasnije biti više riječi. Najvažniji dio regulatora, koji ga čini specifičnim naspram klasičnog PID-regulatora, postupak je izbora upravljačke akcije. Postupak je, u osnovi nelinearan, relacijski a ne funkcijski, pa odatle i nelinearna svojstva cijelom regulatoru, što je, kako će se kasnije pokazati, jedna od njegovih prednosti. Izbor upravljačke akcije provodi se u nekoliko koraka na temelju tzv. protokola vođenja koji čini skup pravila vođenja. Opći oblik pravila vođenja je uvjetna rečenica:

»Ako je $e = E_i^*$ i $\Delta e = CE_i^*$ i $\Delta^2 e = CCE_i^*$, tada je promjena upravljanja $du = CU_i^*$ « (4)

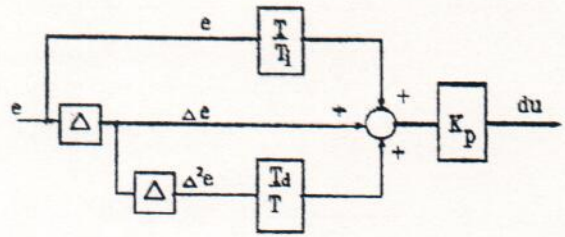
E_i^* , CE_i^* , CCE_i^* , CU_i^* su odgovarajuće vrijednosti ulaznih i izlaznih varijabli iskazane riječima prirodnog jezika i matematički modelirane neizrazitim skupovima. Tipičan primjer je pravilo:

»Ako je $e =$ pozitivno velik i $\Delta e =$ negativno mali i $\Delta^2 e =$ nula, tada je $du =$ negativno srednji« (5)

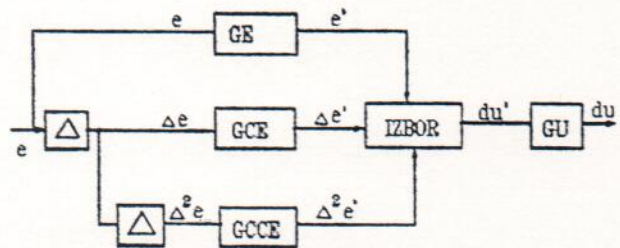
Matematičko značenje pojmovima »pozitivno velik«, »negativno mali«, »nula« i »negativno srednji« mogu dati npr. neizraziti skupovi, čija je pridružena funkcija prikazana na sl. 7.

Prvi korak pri izboru upravljačke akcije je izbor pravila koja odgovaraju stvarnim konkretnim, numeričkim vrijednostima ulaznih varijabli e_n , Δe_n i $\Delta^2 e_n$. Kako se neizraziti skupovi međusobno preklapaju, obično se izabere više pravila za istu trojku ulaznih vrijednosti.

Slijedeći korak je proračun doprinosa promjeni upravljanja svakoga pojedinog pravila. Pri tome se koristi kompozicijsko pravilo utjecaja (vidi Prilog), koje na neki način, matematički modelira postupak dedukcije. Rezultat tog proračuna su neizraziti skupovi promjene



Sl. 1. Shematski prikaz klasičnog PID-regulatora



Sl. 2. Shematski prikaz nelinearnog PID-regulatora

upravljanja. Na primjer, pretpostavi li se da su pridružne funkcije lingvističkih vrijednosti i -tog pravila $f_{Ei}(e)$, $f_{CEi}(\Delta e)$, $f_{CCEi}(\Delta^2 e)$ i $f_{CUi}(du)$, pridružna funkcija $f_{CUin}(du)$ promjene upravljanja CU_{in} dobiva se za konkretnu trojku realnih vrijednosti $(e_n, \Delta e_n$ i $\Delta^2 e_n)$ izrazom:

$$f_{CUin}(du) = \min [f_{Ei}(e_n), f_{CEi}(\Delta e_n), f_{CCEi}(\Delta^2 e_n)] \cdot f_{CUi}(du) \quad (6)$$

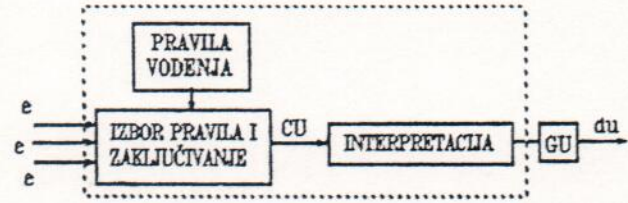
Neizraziti skup ukupne promjene upravljanja CU^* za sva pravila koja su bila aktivirana u tom n -tom trenutku dobije se unijom (vidi Prilog) pojedinačnih neizrazitih skupova.

Posljednji korak je izbor jednog od elemenata podrške neizrazitog skupa promjene upravljanja CU^* koji najbolje reprezentira taj neizraziti skup. Postupak se zove interpretacija neizrazitog skupa, a metoda može biti npr. proračun težišta pridružne funkcije neizrazitog skupa CU^* . Dobiveni rezultat predstavlja izabranu upravljačku akciju, koja nakon množenja s konstantom GU , daje stvarnu vrijednost promjene upravljanja du_n .

Iz prikazanog načina rada nelinearnog PID-regulatora, koji se često naziva neizraziti PID-regulatora (eng. fuzzy PID controller) kako bi se naglasio značaj teorije neizrazitih skupova, lako se uoči da su nelinearna svojstva dobivena skupom pravila vođenja. Pravilima vođenja, koja su u svojoj osnovi heuristička, sustavu automatskog vođenja prenosi se na neki način iskustvo i intuicija čovjeka operatera kojima se on koristi pri ručnom vođenju datog sustava. Brojni primjeri potvrđuju spoznaju da je iskusan operater kadar voditi i najsloženije sustave. Međutim, iskusni operateri su rijetki, a i prilikom prikupljanja pravila vođenja javljaju se brojni problemi, kao npr. paradoks ekspertize [7], koji kaže da se sposobnost eksperta da opiše znanje kojim se koristi smanjuje ako je on stručniji za određeno područje.

Upravo zbog toga pojavile su se ideje o automatizaciji postupka formiranja i promjene skupa pravila u toku samog vođenja dodavanjem posebnog višeg nivoa adaptacije. Na tim idejama temelje se adaptivni nelinearni PID-regulatori.

3. ADAPTIVNI NELINEARNI PID-REGULATORI



Sl. 3. Shematski prikaz bloka za izbor upravljačke akcije

Blok sa sl. 2, u kojem se provodi izbor upravljačke akcije, može se razbiti na nekoliko funkcionalnih cjelina i shematski prikazati sl. 3.

Adaptivna petlja ima isti ulaz kao i blok za izbor upravljačke akcije, a izlaz joj je formiranje i promjena pravila vođenja. Ideja je, u osnovi, vrlo jednostavna. Na temelju trojke vrijednosti pogreške i njezinih pro-

nelinearnoga adaptivnog PID-regulatora, od kojih je najvažnija ta što je osnovni dio MRAC-a linearni regulator čiji se linearni parametri adaptivno podešavaju. S druge strane, kod adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora ne podešavaju se linearni parametri (to su npr. konstante pojačanja GE, GCE, GCCE i GO), već se podešava nelinearni dio regulatora — skup pravila vođenja. Na taj način regulator se lakše prilagođava nelinearnim karakteristikama sustava kojeg se vodi. Osim toga, kod MRAC-a postoji više-manje dobro razrađen postupak sinteze regulatora temeljen uglavnom na kriterijima stabilnosti, a kod nelinearnoga adaptivnog PID-regulatora ne postoji sistematična metoda projektiranja. Ne postoji jedinstveni postupak kojim se:

- a) definiraju neadaptivni parametri regulatora, kao što su konstante pojačanja GE, GCE, GCCE, GO te vremenska konstanta τ
- b) definira tablice promjene.

Pitanje je da li će se opći postupak ikad moći i postaviti, zato što se regulator u najvećoj mjeri naslanja na heurističke metode koje je izuzetno teško, ako ne i nemoguće, matematički formalizirati. U slijedećem poglavlju dat će se osvrt na neke metode podešavanja regulatora te predložiti nova metoda koja se temelji na heurističkim meta-pravilima o podešavanju parametara.

4. PROJEKTIRANJE REGULATORA

Kao što je ranije rečeno, tablica promjene definira željeni odziv vođenog sustava položajem nula, te postupak adaptacije položajem i iznosom ne-nultih elemenata. Lambesis [9] i donekle Sugiyama [5] proveli su iscrpnu analizu svojstava tablice promjene, te predložili nekoliko različitih tablica, koje se mogu podijeliti u dvije grupe:

- a) tablice kod kojih su nulti elementi na dijagonali
- b) tablice kod kojih se nulti elementi spiralno približavaju centralnom elementu koji definira željeno stanje $e = \Delta e = \Delta^2 e = NO$.

Tablice sa spiralnim položajem nultih elemenata imaju nekoliko nedostataka. Na primjer, posebne se tablice trebaju definirati za pozitivne i negativne početne pogreške [9], pa se veći značaj daje tablicama s dijagonalnim položajem nultih elemenata. Takva tablica, preuzeta iz [5], korištena je i u ovim simulacijskim istraživanjima.

Drugi problem je odabir neadaptivnih parametara tako da regulator daje što optimalniji odziv. Pokušaji da se pri tome koriste analogije sa Zigler-Nicholsovom metodom ili metodom karakteristične jednadžbe [9] uglavnom su urodili neuspjehom, što dodatno potvr-

duje činjenicu da postoji samo površna sličnost između nelinearnog (neizravnog) PID-regulatora i klasičnog PID-regulatora.

Uspješniju metodu ugadanja parametara predložio je Sugiyama [5]. Metoda se zasniva na tablici promjene koja na dijagonali ima nulte elemente i njenoj sličnosti s referentnim modelom sustava drugog reda. Sugiyama povezuje parametre GE, GCE i GCCE s karakterističnim veličinama odziva sustava, i to sa stupnjem prigušenja ζ i frekvencijom neprigušenih oscilacija ω_N . Međutim, i tu se javljaju određeni problemi, a najviše zbog toga što se kao referenca postavlja linearni model, a regulator je, u osnovi, nelinearan.

Polazište ove metode su heuristička i iskustvena znanja o ponašanju sustava vođenih adaptivnim nelinearnim PID-regulatorom. Vodilja je prije svega bila činjenica da je nelinearni (neizravnog) PID-regulator uveden kao više ili manje dobra kopija postupaka kojim se služi čovjek-operator pri vođenju. Kako su ti postupci, u osnovi heuristički, zašto se ne bi i neadaptivni parametri podešavali heurističkim metodama. Cilj intenzivnih simulacijskih istraživanja bilo je postavljanje meta-pravila o ugadanju parametara, odnosno pravila koja bi opisivala utjecaj povećavanja i smanjivanja pojedinih parametara na karakteristike odziva sustava. Pri tome su korištene i spoznaje drugih istraživača, posebno iz [5, 8, 9].

Četiri su osnovna parametra koje treba podešavati: konstante pojačanja pogreške GE, promjene pogreške GCE, promjene promjene pogreške GCCE i promjene upravljanja GO. Utjecaj promjene pojedinih parametara (uz ostale parametre nepromijenjene) na svojstva odziva sustava definira se sa 5 pravila:

1. Pravilo o utjecaju GE:

Što je GE manji, to je prigušenje sustava veće, prebačaji u odzivu su manji, povećava se područje tolerancije oko referentne vrijednosti, što povećava pogrešku ustaljenog stanja i odziv je znatno sporiji.

Napomena: previše velik GE uzrokuje oscilacije ograničene amplitude te uzrokuje nestabilnost.

2. Pravilo o utjecaju GCE:

Što je GCE manji, to je prigušenje sustava manje, prebačaji u odzivu su veći, a odziv sustava neznatno je brži.

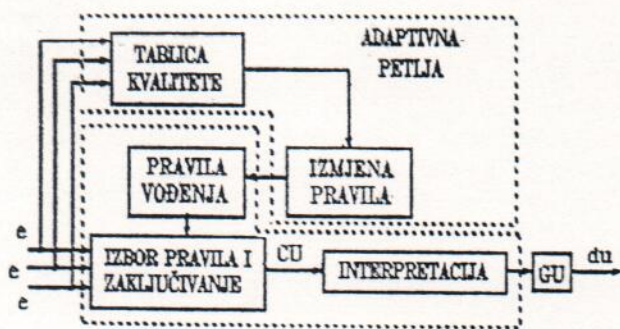
Napomena: previše mali GCE uzrokuje nestabilnost.

3. Pravilo o utjecaju GCCE:

Što je GCCE manji, to je prigušenje sustava manje, prebačaji u odzivu su veći, ali je odziv sustava brži.

Napomena: previše velik GCCE ponovo uzrokuje povećanje prebačaja i pojavu izobličenja u odzivu koji za još veće vrijednosti prerastaju u oscilacije ograničene amplitude i nestabilan odziv.

Stipančev: Diskretno vođenje složenih sustava adaptivnim nelinearnim PID-regulatorima
nelinearnoga najvaž...



Sl. 4. Shematski prikaz adaptivnog dijela adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora

Δe	NV	NS	NM	NO	PM	PS	PV
NV	PV	PV	PS	PS	PM	PM	NO
NS	PV	PV	PS	PM	PM	NO	NM
NM	PV	PS	PM	PM	NO	NM	NM
NO	PS	PM	PM	NO	NM	NM	NS
PM	PM	PM	NO	NM	NM	NS	NV
PS	PM	NO	NM	NM	NS	NV	NV
PV	NO	NM	NM	NS	NS	NV	NV

p - promjena du

Tabl. I. Tablica promjene za $\Delta^2 e = NO$

mjena ($e_n, \Delta e_n, \Delta^2 e_n$) i tablice promjene, koja se često naziva tablica kvalitete [4], utvrđuje se:

- a) da li regulator dobro vodi sustav
- b) ako ne vodi ($e_n \neq 0$), za koliko bi trebalo promijeniti upravljačku varijablu.

Radi se, u stvari, o promjeni promjene upravljanja u posljedičnom dijelu pravila vođenja. Sada se postavlja pitanje koja pravila promijeniti, jer očito je da je za sadašnji iznos pogreške odgovorno neko pravilo ili neka od onih koja su bila aktivna u prošlosti vođenja. Problem se rješava tako da se, na temelju približnoga, heurističkog znanja o dinamici vođenog sustava, definira konstanta τ , koja kaže da su za rezultate dobivene u n -tom diskretnom trenutku vremena odgovorna pravila koja su bila aktivirana u $(n - \tau)$ diskretnom trenutku vremena, dakle τ diskretnih jedinica u prošlosti. Na sreću, ova istraživanja, kao i istraživanja drugih istraživača [5], pokazala su da izbor konstante τ nije toliko kritičan i da će se regulator zadovoljavajuće ponašati u širem području vrijednosti τ .

Iz iznesenog slijedi da adaptivna petlja mora sadržavati i memoriju u kojoj su spremljeni podaci o prošlosti vođenja, podaci o tome koja pravila su bila aktivna τ diskretnih trenutaka vremena u prošlosti. Na temelju tablice promjene, mehanizmom izmjene pravila mijenja se posljedični dio odgovornih pravila vođenja, odnosno ako pravilo nije ni postojalo, nadodaje se novo pravilo.

Strukturnu shemu adaptivnog dijela adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora prikazuje sl. 4.

Tablica promjene, na neki način, objedinjuje osnovne značajke adaptivnog regulatora s referentnim modelom (MRAC). Prema dobro razrađenoj teoriji MRAC-a [9], to su prije svega karakteristike referentnog modela kojim se određuju svojstva željenog odziva vođenog sustava i karakteristike zakona adaptacije kojim se definira način dolaženja do željenog oblika regulatora. U tom slučaju odziv sustava će se poklapati sa željenim odzivom. Ta će se sličnost sada pogledati detaljnije.

Verbalni oblik tablice promjene je skup pravila pro-

mjene vrlo sličnih pravilima vođenja (6), na primjer:

»Ako je $e = PV$ i $\Delta e = NV$ i $\Delta^2 e = NO$, tada promjena p promjena upravljanja d u odgovarajućim pravilima treba biti $p = NO$ « (7)

gdje su PU, NV i NO mnemotici vrijednosti »pozitivno velik«, »negativno velik« i »nula«. Pretpostavi li se da su dopuštene lingvističke vrijednosti PV, PS, PM, NO, NM, NS, NV, što znači »pozitivno velik«, »srednji« i »mali«, »nula« te »negativno velik«, »srednji« i »mali«, tablica promjene za $\Delta^2 e = NO$ može izgledati kao tabl. I.

U fazi učenja i prilagodbe vrijednost promjene p različita je od nule (NO), te dolazi do promjene posljedičnog dijela odgovarajućih pravila vođenja. Pretpostavi li se konvergencija procesa učenja, nakon određenog vremena i broja testova, ustalit će se odgovarajući skup pravila vođenja koji se više neće mijenjati (ako ne dođe do tolike promjene sustava da se zahtijeva nova adaptacija). To znači da će vrijednost promjene p u nastavku uvijek biti jednaka nuli, odnosno da će se u tablici promjene uvijek posjećivati vrijednosti za koje je p jednak nuli. Vođeni sustav se ponaša upravo onako kako bi se trebao ponašati, pa nije potrebno provoditi promjenu pravila vođenja. Očito je, dakle, da položaj nula u tablici promjene, na neki način, definira karakteristike željenog odziva. Ako su nule na drugim mjestima nakon završetka procesa adaptacije, trajektorija sustava u odnosu na pogrešku i njene promjene ponovo će biti takva da će se posjećivati nule tablice promjene, što će dati potpuno drugačije karakteristike željenog odziva sustava.

S druge strane, ne-nulte vrijednosti tablice kvalitete definiraju iznose promjene pravila vođenja, što drugim riječima znači da definiraju način na koji se dolazi do stalnog skupa pravila vođenja.

Ako se sada ponovo gleda adaptivno vođenje s referentnim modelom (MRAC), vidi se da položaj nula u tablici kvalitete odgovara definiciji referentnog modela MRAC-a, a iznosi ne-nultih elemenata su kvalitativni ekvivalenti zakonu adaptacije MRAC-a.

Jasno, postoje i neke bitne razlike između MRAC-a i

4. Pravilo o utjecaju GO:

Što je GO manji, to je odziv sustava sporiji, a nadvišenje veće, ali s druge strane GO mora biti dovoljno mali da male promjene upravljačkog signala ne odvedu izlaz sustava previše daleko od područja tolerancije.

Napomena: previše velik GO uzrokuje oscilacije ograničene amplitude i nestabilnost sustava.

5. Pravilo o relativnim odnosima parametara:

Relativni odnos parametara koji daje zadovoljavajuće odzive je $GCE > GCCE \geq GE$. Pri tome GCE treba biti najmanje 3 do 4 puta veći od GE (Yamazaki predlaže odnos GCE/GE od 4 do 6).

Sl. 5 ilustrira neka od ovih svojstava. Odziv sustava je prikazan u faznoj ravni pogreške (e) — promjena pogreške (ce). Rezultati su dobiveni simulacijom vođenja sustava drugog reda s kašnjenjem, o čemu će više govora biti u slijedećem poglavlju. Ciljno stanje je ishodište fazne ravnine ($e = ce = 0$). Sl. 5a prikazuje zadovoljavajuće brzi odziv s malim prebačajem ($M_p = 11,4\%$, $T_p = 1$ s). Utjecaj varijacija pojedinih parametara prikazuju ostale slike. Mijenja se naznačeni parametar, a ostali su isti kao kod a). Lako se može uočiti da je npr. za $GE = 0,5$ (sl. 5b) prigušenje sustava veće, pa nema prebačaja (cijela trajektorija leži na lijevoj strani fazne ravnine, što znači da pogreška nikad nije negativna). Odziv za $GCE = 2$ (sl. 5e) ima izuzetno veliku vrijednost prebačaja ($M_p = 30\%$), a odziv za $GO = 3,7$ (sl. 5i) ima velik broj prebačaja, a odziv za $GCCE = 5$ (sl. 5g) izobličen je (približavanje ciljnom stanju nije harmoničko).

Primjere oscilirajućih odziva prikazuje sl. 6. U slučajevima velikog GE, GCCE i GO javljaju se oscilacije relativno male ograničene amplitude, a za male vrijednosti konstante GCE amplitude oscilacija su znatne. Osnovni parametri podešavanja su GE i GCE. Procedura je slijedeća:

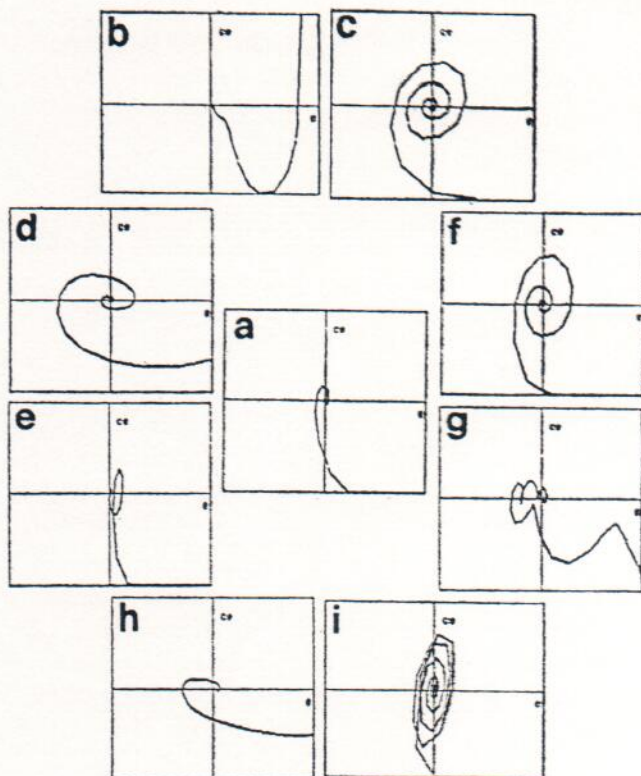
krene se s početnom vrijednošću parametara npr. $GC = 1$, $GCE = 4$, $GCCE = 1$, $GO = 1$; ako je prebačaj u odzivu previše velik, treba ga smanjiti:

- povećavanjem GCE
- smanjivanjem GE ako se može dopustiti sporiji odziv.

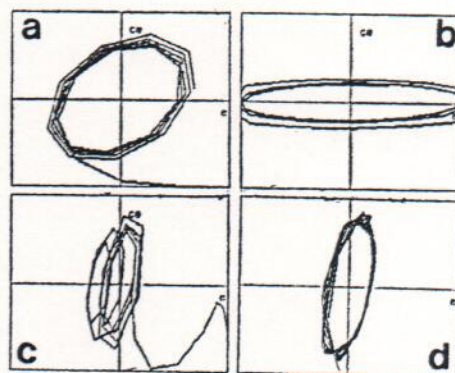
Sada se povećava GCCE, što utječe na brzinu konvergencije u blizini referentne vrijednosti sve dok je prebačaj još zadovoljavajući, a odziv nije izobličen. Posljednji se podešava GO tako da treba biti što veći, kako bi odziv sustava bio što brži, ali još bez oscilacija oko referentne vrijednosti.

U slijedećem poglavlju bit će prikazani odzivi sustava kod kojeg su parametri regulatora podešavani na taj način.

Postupci podešavanja mogu se i automatizirati. Na primjer, dodavanjem nove petlje adaptacije koja se



Sl. 5. Utjecaj promjene parametara na odzive vodenog sustava
 a) $GE = 1$, $GCE = 4$, $GCCE = 1$, $GO = 2$
 b) $GE = 0,5$, c) $GE = 2$, d) $GCE = 2$
 e) $GCE = 6$, f) $GCCE = 0,2$
 g) $GCCE = 5$, h) $GO = 0,5$, i) $GO = 3,5$



Sl. 6. Primjeri oscilirajućih odziva a) $GE = 2,5$,
 b) $GCE = 0,58$, c) $GCCE = 6,5$, d) $GO = 3,8$,
 ostalo isto kao na sl. 5a

aktivira nakon svakog koraka podešavanja pravila regulatora [10].

5. SIMULACIJA VOĐENJA

Djelotvornost regulatora ilustrirat će se rezultatima simulacije sustava vođenog adaptivnim nelinearnim PID-regulatorom te klasičnim optimalno podešenim PID-regulatorom. Simulirani sustav zadan je prijenosnom funkcijom:

$$G(s) = \frac{1,24 e^{-0,25}}{(1 + 1,1s)(1 + 0,21s)} \quad (8)$$

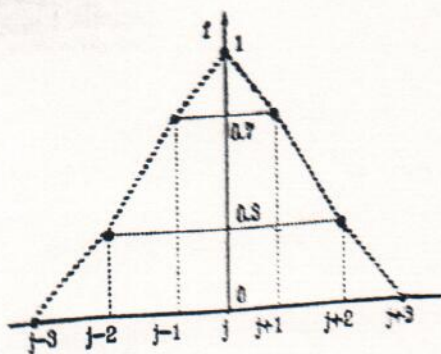
Međutim, pri projektiranju i podešavanju i jednog i drugog regulatora nije pretpostavljeno poznavanje matematičkog modela. Klasični PID-regulator podešen je diskretnom verzijom Zigler-Nicholsovog postupka [11] na temelju parametara odziva otvorenog sustava [11] na temelju parametara odziva otvorenog sustava i vremena uzimanja uzoraka, a parametri adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora podešeni su postupkom opisanim u prethodnom poglavlju.

Algoritam vođenja nelinearnog PID-regulatora zasni-
vao se na jednadžbi (6), uz određene modifikacije. Prva je ta što su ulazne i izlazne veličine bile linearno kvantizirane na 13 nivoa, tako da su svi neizraziti skupovi imali diskretnu podršku $Q = \{-6; -5; \dots; 0; \dots; +6\}$. Svaki element podrške Q ujedno i definira jedan temeljni neizraziti skup kojim se modeliraju vrijednosti u uzročnom i posljedičnom dijelu pravila vođenja. Svi ti neizraziti skupovi imali su isti trokutasti oblik pridružne funkcije, shematski prikazan na sl. 7; j može biti bilo koji element kvantizirane podrške $\{-6; \dots; 6\}$. Očito je da će krajnji temeljni neizraziti skupovi za $j = -6$ i $j = 6$ oblikom odgovarati samo polovici neizrazitog skupa definiranog sl. 7.

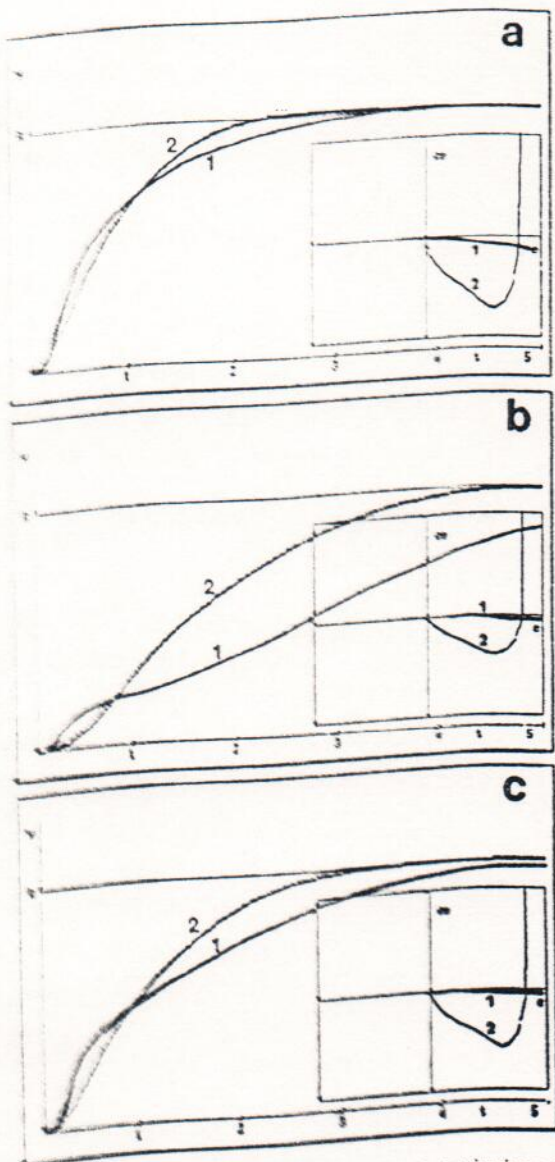
Pravila vođenja sada se mogu iskazati četvorkom vrijednosti $(e_Q, \Delta e_Q, \Delta^2 e_Q, du_Q)$, gdje $e_Q, \Delta e_Q, \Delta^2 e_Q$ i du_Q odgovaraju kvantiziranim vrijednostima kojima se definira položaj maksimuma odgovarajućih neizrazitih skupova. Tipičan primjer je četvorka $(3, -2, 0; 0)$, koja kaže da je promjena upravljanja jednaka neizrazitom skupu za koji je $j = 0$ (sl. 7) ako su pogreška i njene promjene jednake odgovarajućim neizrazitim skupovima definiranim s prve tri vrijednosti.

Kvantiziranjem podrški ubrzava se proračun akcije regulatora te pojednostavljuje postupak formiranja i izmjene pravila, ali se, s druge strane, unosi pogreška kvantizacije. Njen utjecaj smanjuje se uz pomoć tzv. trapezne implementacije [12] koja je korištena i u ovim simulacijama.

Valja sada pogledati rezultate. Sl. 8a prikazuje odzive sustava vođenog optimalno podešenim PID-regulatorom ($K_p = 1,2; T_i = 1,25; T_d = 0,25$) te adaptivnim nelinearnim PID-regulatorom podešenim tako da mu



Sl. 7. Pridružna funkcija temeljnoga neizrazitog skupa



Sl. 8. Odzivi sustava vođenog klasičnim (1) i adaptivnim nelinearnim (2) PID-regulatorima: a) sustav opisan prijenosnom funkcijom (8), b) serijski spoj kvadratske nelinearnosti i sustava (8), c) serijski spoj nelinearnosti s mešovitim ponornim sustava (8)

odziv bude što brži i bez prebačaja. Vrijednosti konstanti pojačanja su bile $GE = 0,5$, $GCE = 5$, $GCCE = 2$, $GO = 1$, a $\tau = 3$, što približno odgovara kašnjenju sustava. U oba slučaja interval uzimanja uzoraka bio je $T = 0,1$, a pobuda je bila skokovita amplitude 10. Maksimalna je vrijednost upravljačkog signala limitirana na 100. Dobiveni rezultati vrlo su slični, odnosno kvaliteta vođenja približno izjednačena. Međutim, prava kvaliteta adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora dolazi do izražaja tek u slučaju izrazito nelinearnog sustava.

Sl. 8b i 8c prikazuje dva takva primjera. Prvi je za serijski spoj sustava prijenosne funkcije (8) i kvadratne nelinearnosti $U^* = U^2/100$, gdje je U upravljačka varijabla sustava na ulazu, a U^* na izlazu nelinearnog bloka. Drugi slučaj je također za serijski spoj sustava (8) i nelinearnosti s mrtvom zonom širine 5. Prednosti adaptivnoga nelinearnog PID-regulatora su očite.

6. ZAKLJUČAK

Poseban problem teorije automatskog vođenja je vođenje sustava čiji matematički model nije poznat zato što ga nije moguće ili nije isplativo razvijati. Predložen je niz postupaka za rješavanje tog problema, od kojih u posljednje vrijeme najviše pažnje privlače postupci temeljeni na rezultatima teorije umjetne inteligencije, i to posebno postupci kojima matematičku osnovu daje Zadehova teorija neizrazitih skupova. Radi se, u stvari, o nelinearnim digitalnim regulatorima poznatim pod nazivom neizraziti regulatori koji sadrže bazu heurističkog znanja o vođenju procesa tzv. skup-pravila vođenja. Kod jednostavnih regulatora ovoga tipa, ova pravila vođenja daju se a priori na temelju znanja operatera o vođenju dotičnog sustava. Savršeniji oblik regulatora ima sposobnost učenja, samostalnog formiranja, ispravljanja i nadopune baze znanja o vođenju sustava, pa mu pravila vođenja nije potrebno definirati prije samog vođenja.

Takav adaptivni regulator analiziran je u ovom radu. Ustanovljene su brojne sličnosti ovakvog načina vođenja s klasičnim vođenjem PID-regulatorom i adaptivnim vođenjem s referentnim modelom (MRAC), ali i neke bitne razlike. To se, prije svega, odnosi na pitanje linearnosti i nelinearnosti prikazanog regulatora u odnosu na klasične regulatore.

Također je predložen novi pristup ugađanju parametara regulatora temeljen na heurističkom znanju o ponašanju sustava vođenog adaptivnim nelinearnim PID-regulatorom. Postupak se može automatizirati te na taj način regulator učiniti još samostalnijim i prilagodljivijim sustavu koji je potrebno voditi.

Potencijalno područje primjene ovakvog tipa vođenja je npr. vođenje daljinski upravljane robotizirane autonomne ronilice, prije svega zbog toga što je njeno

gibanje izuzetno teško dobro matematički modelirati. Drugi primjer je inteligentna senzorski vodena robotika kod koje se zahtijeva velik stupanj prilagodljivosti različitim situacijama te sposobnost samoučenja. To su samo neki od primjera koji ukazuju na to da adaptivnom nelinearnom PID-vođenju predstoji dinamička budućnost.

PRILOG:

OSNOVNI POJMOVI TEORIJE NEIZRAZITIH SKUPOVA

Teoriju neizrazitih skupova (eng. Fuzzy set theory) uveo je 1965. g. L. A. Zadeh kao generalizaciju klasične teorije skupova, poopćavanjem pojma pripadnosti, a s ciljem rješavanja zadataka koji u sebi nose elemente neodređenosti i subjektivnosti. Ovdje će se samo kratko navesti neki osnovni pojmovi ove teorije nužni za razumijevanje rada. Više detalja može se pronaći u brojnim knjigama, od kojih se, prije svega, ističe knjiga [13].

Neizraziti skup A^* iz X definira se kao skup uređenih parova $A^* = (x, f_A(x))$, gdje je X običan klasični skup, a $f_A(x)$ pridružna funkcija koja svakom $x \in X$ pridružuje broj iz intervala $[0; 1]$.

Nosač neizrazitog skupa A^* iz X je podskup skupa X za čije elemente je $f_A(x) > 0$.

Unija (\cup), presjek (\cap) i komplement ($\bar{}$) neizrazitih skupova A^* , B^* iz X definiraju se izrazima:

$$C^* = A^* \cup B^*, f_C(x) = \max [f_A(x), f_B(x)]$$

$$D^* = A^* \cap B^*, f_D(x) = \min [f_A(x), f_B(x)]$$

$$\bar{A}^*, f_{\bar{A}}(x) = 1 - f_A(x)$$

Unija odgovara vezniku ili, a presjek vezniku i.

Kompozicijsko pravilo utjecaja je možda najzanimljiviji dio teorije neizrazitih skupova. Radi se, u stvari, o modelu ljudskog postupka donošenja zaključaka, ljudskog postupka dedukcije. Pomoću kompozicijskog pravila utjecaja na temelju premisa, od kojih jedna daje vrijednosti ulaznih varijabli, a druga zakon ovisnosti izlaznih i ulaznih varijabli, dobiva se odgovor, zaključak, vrijednost izlazne varijable. U općem slučaju sve te vrijednosti su iskazane prirodnim jezikom i modelirane neizrazitim skupovima. Vođenje je specifičan slučaj, da su ulazne vrijednosti realne, a zakon ovisnosti, koji predstavljaju pravila vođenja, sadrži neizrazite implikacije. Odgovor, zaključak, također treba biti realna vrijednost. Do nje se dolazi tako da se prvo primijeni kompozicijsko pravilo utjecaja, pa se nakon toga provede interpretacija dobivenoga neizrazitog skupa odgovora. U radu je korištena max-produkt kompozicija, tako da se izrazom (6) proračuna za svako pravilo neizraziti skup odgovora, a nakon toga se

napravi unija (operacija max) svih odgovora. Završni dio je interpretacija dobivenoga jedinstvenog neizrazitog skupa.

LITERATURA

- [1] Mayers J., Scherif Y. S.: Application of Fuzzy Set Theory, IEEE Trans. Syst. Man. Cyb., Vol. 15, No. 1, pp. 175N189, 1985.
- [2] Sugeno M. (ed): Industrial Application of Fuzzy Control, North-Holland, Amsterdam, 1985.
- [3] Mamdani E. H., Stipaničev D.: Fuzzy Set Theory and Process Control-Past, Present and Future, Proc. of IFAC Symp. on Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, France, pp. 269—272, 1989.
- [4] Procyk T. J., Mamdani E. H.: A Linguistic Self-organising Process Controller, Automatica, Vol. 15, pp. 15—30, 1979.
- [5] Sugiyama K.: Rule-Based Self-Organising Controller, u knjizi M. M. Gupta, T. Yamakawa (ed) »Fuzzy Computing: Theory, Hardware and Applications«, North Holland, Amsterdam, pp. 341—353, 1988.
- [6] Graham B. P., Nowell R. B.: Fuzzy Adaptive Control of a First-Order Process, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 31, pp. 47—65, 1989.
- [7] Hart A.: Knowledge Acquisition for Expert Systems, Mc Graw Hill, New York, 1986.
- [8] Lambesis E.: Dynamic Learning Behaviour of a Rule-Based Self-Organising Controller, Ph. D. Thesis, Queen Mary College, University of London, 1984.
- [9] Yamazaki T., Mamdani E. H.: On the Reformances of a Rule-Based Self-Organising Controller, Proc. IEE Conf. on Adaptive and Multi-Variable Control, Hull, U. K., 1982.
- [10] De Neyer M., Stipaničev D., Gorez R.: Intelligent Self-Organising Controllers and Their Application to the Control of Dynamic System, IMACS Intr. Symp. on Mathematical and Intelligent Models in System Simulation, Brussel, Sept. 3—7, 1990.
- [11] Bennet S.: Real Time Computer Control, Prentice Hall, New York, pp. 119, 1988.
- [12] Ollero A., Gracia-Cerezo A. J.: Direct Digital Control, Auto-Tuning and Supervision using Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 30, pp. 135—153, 1989.
- [13] Dubois D., Prade H.: Fuzzy Sets and Systems: Theory and application, Academic Press, New York, 1980.

Adresa autora:

Dr. Darko Stipaničev, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
R. Boškovića bb, 58000 SPLIT

Uredništvo primilo rukopis: 1990-06-12

NAPOMENA

Rad je nastao u sklopu projekta Automatizacija i robotizacija proizvodnih sustava što ga financira SIZ znanosti SR Hrvatske i u sklopu suradnje s Laboratoire d'automatique, de dynamique et d'analyse de systems, Universite Catholique de Louvain, Louvain La Neuve, Belgique na projektu D. E. S. I. R. E. (Dynamic Expert Systems in Robot Experimentation). Pri razradi programa za simulaciju vođenja sudjelovalo je više suradnika, od kojih se izdvajaju Marc de Neyer i Alica Kučić.