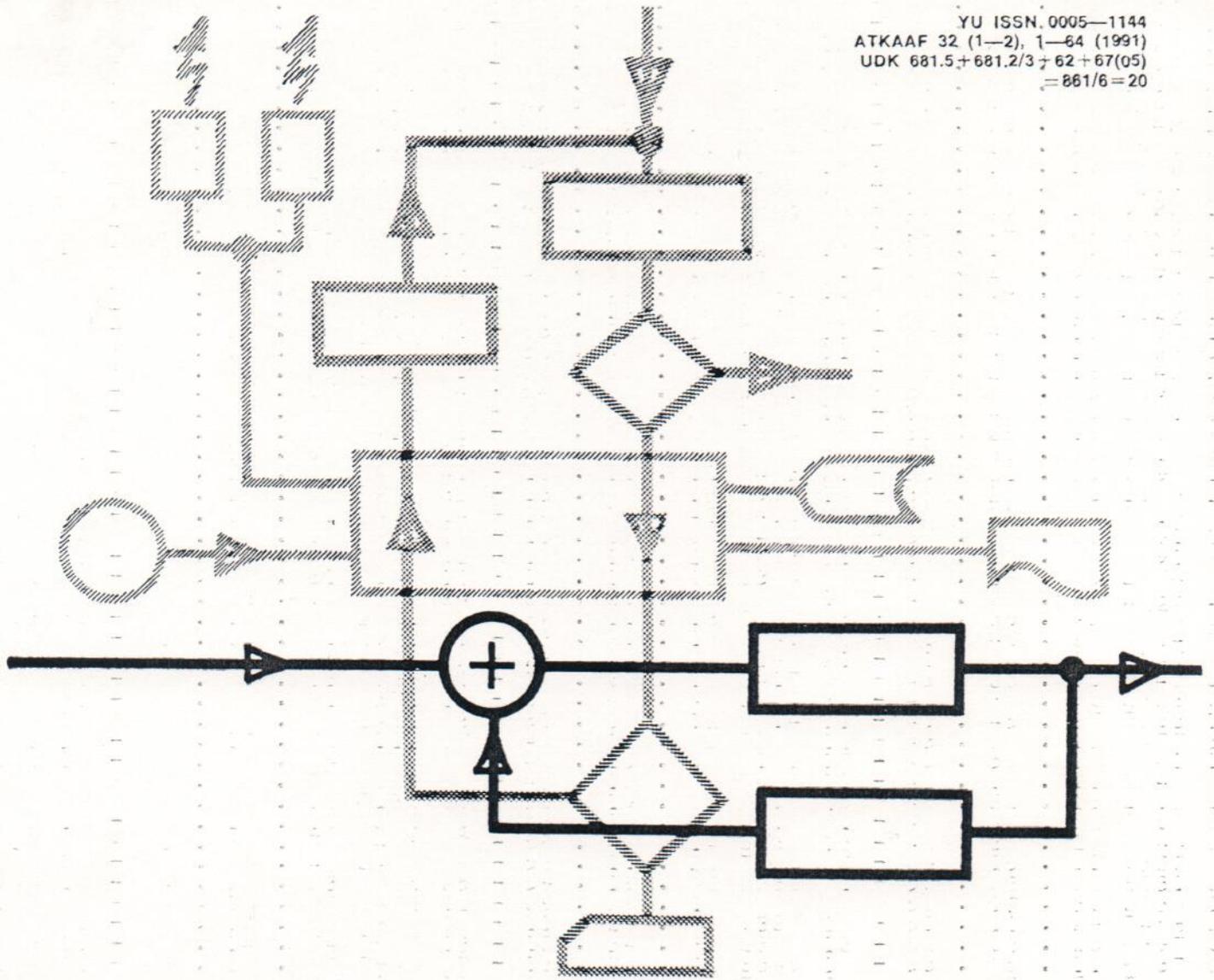


1.4.7.

YU ISSN. 0005—1144  
ATKAAF 32 (1—2), 1—64 (1991)  
UDK 681.5+681.2/3+62+67(05)  
=861/6=20



jugoslavenski časopis za automatizaciju i informatiku  
automatika god. 32, zagreb, januar—april 1991, broj 1—2, str. 1—64

**automatika**  
1-2/1991 GODINA  
32

## Časopis izdaje Jugoslavenski savez za ETAN

Casopis izlazi tri do šest puta godišnje

### SUDJELUJU U SUFINANCIRANJU

Ministarstvo znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske  
Savez republičkih i pokrajinskih zajednica znanosti SFRJ

### OSNIVACI

Energoinvest poduzeće za projektovanje i izgradnju energetskih i industrijskih postrojenja Sarajevo — Zdrušeno podjete Iskra-Kranj — Jugoslavenski savez za elektroniku, telekomunikacije, automatiku i nuklearnu tehniku (ETAN), Beograd — ATM Poduzeće za automatiku i tehniku mjerenja u industriji Zagreb — Elektrotehnički institut poduzeća »Rade Končar«, Zagreb — Fabrika »Teleoptik« Zemun — Zavod za avtomatizaciju, Ljubljana — Unimatik, poslovno udruženje za avtomatizaciju, Beograd

### IZDAVAČKI SAVJET

Predsjednik: Ivo Bautović, INA, Industrija nafte, Zagreb; prof. Jože Černelč, Elektrotehnički fakultet Zagreb; Ivica Gretić, Republički odbor SUBNOR SRH, Zagreb; prof. dr. Ludvik Gyergyek, Fakulteta za elektrotehniku, Ljubljana; dr. Nenad Marinović, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; prof. dr. Vladimir Muljević, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; Jovo Pavlović, Jugoslavenski savez za ETAN, Beograd; dr. Slobodan Radoman, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Bruno Rusjan, Iskra, Elektromehanika TOZD TTS, Ljubljana; prof. dr. Asif Šabanović, Energoinvest IRCA, Sarajevo; dr. Bruno Stiglic, Iskra, Industrija za avtomatiko, Ljubljana; prof. dr. Tugomir Surina, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; prof. dr. Rajko Tomović, Elektrotehnički fakultet, Beograd; Marijan Zambeli, ATM, Zagreb.

### GLAVNI UREDNIČKI ODBOR

Predsjednik: prof. Jože Černelč, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Paja Ciner, Tehnička vojna akademija, Zagreb; prof. dr. Milan Calović, Elektrotehnički fakultet, Beograd, mr. Fikret Čejvan, ATM, Zagreb; prof. dr. Ljubiša Draganović, Energoinvest, IRCA, Sarajevo; prof. Vaso Gluhajčić, Institut »M. Pupin«, Beograd; prof. dr. Abduraman Grapci, Tehnički fakultet, Priština; prof. dr. Emir Humo, Univerzitet »Dž. Bijedić«, Mostar; prof. dr. Janko Janković, Tehnički fakultet, Titograd; Danijel Jurjevec, Savezna privredna komora, Beograd; dr. Vukašin Masnikosa, Institut »M. Pupin«, Beograd; Vladimir Matijević, INEM, SOUR »R. Končar«, Zagreb; prof. dr. Vladimir Muljević, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Anton Ogorelec, Fakulteta za elektrotehniku, Ljubljana; prof. dr. Nedžad Pašalić, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Borivoje Rajković, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; Branko Robavs, Iskra Industrija za avtomatiko, Ljubljana; prof. dr. Milić Stojić, Elektrotehnički fakultet, Beograd; Anton Stuček, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana; prof. dr. Pane Vidinčev, Elektrotehnički fakultet, Skopje; prof. dr. Miomir Vukobratović, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Anton Zeleznikar, Elektrotehna - Delta, Razvoj software, Ljubljana.

### UZI UREDNIČKI KOLEGIJ

Jože Černelč, Vladimir Matijević, dr. Nedžad Pašalić, dr. Borivoje Rajković

### GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Jože Černelč

Tehnički urednik: Zarko Pavunić

Sekretar Glavnog uredničkog odbora: Zlatica Vranješević

Uredništvo i administracija časopisa: »AUTOMATIKA« Zagreb, Unska ulica br. 3, poštanski pretinac 123 (Elektrotehnički fakultet) telefon 629-999 interni 270. Rukopise, preplate, narudžbe oglasa, objave i drugo slati na adresu uredništva. Rukopisi se ne vraćaju.

### PRETPLATA ZA 1991. GODINU

Godišnja pretplata: za pravne osobe 600 din. — za inozemstvo 50 dolara USA — za pojedince 150 din. — za studente 50 din. Pojedini broj izvan pretplate: za pravne osobe 150 din. — za pojedince 40 din. (dvobroj dvostruko). Časopis se narudžuje na adresu uredništva u Zagrebu, a uplaćuje na ZIRO RACUN ZAGREB, 30101-678-5668, JUREMA, Zagreb (za »Automatiku«).

Tisak: GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE — ZAGREB

### UREDNIČKI ODBOR BEOGRAD

Dr. Vukašin Masnikosa, dr. Stanoje Bingulac, dr. Milan Čalović, mag. Mihailo Corović, dr. Miladin Krsmanović, Branko Milosavljević, dr. Petar Miljanić, dr. Nenad Simić, dr. Milić Stojić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Vukašin Masnikosa, 11070 Novi Beograd, Bul. AVNOJ-a 116/17

### UREDNIČKI ODBOR LJUBLJANA

Dr. Anton Ogorelec, dr. France Bremšak, dr. Rafael Cajhen, dr. Ferdo Gubina, Alojz Hussu, Matija Seliger, Stane Slapšak, Jure Tasić, Miha Tomšić, Dimitrij Uran

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Anton Ogorelec, Fakulteta za elektrotehniku, Tržaška 25, 61000 Ljubljana

### UREDNIČKI ODBOR MARIBOR

Dr. Bruno Stiglic, Igor Kapus, Ivan Lešnik, Bogdan Naprudnik, Anton Travan

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Bruno Stiglic, Kamniška 4a, 62000 Maribor

### UREDNIČKI ODBOR NOVI SAD

Dr. Danilo Obradović, Branko Keskenović, dr. Vladimir Kovačević, dr. Milorad Obradović, dr. Đordija Petkovski, dr. Dušan Petrovački

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Danilo Obradović, Društvo za ETAN SAP Vojvodine, Fruškogorska 11, 21000 Novi Sad

### UREDNIČKI ODBOR SARAJEVO

Dr. Emir Humo, dr. Dževad Hasanbegović, Petar Kesić, dr. Ahmed Mandžić, dr. Božidar Matić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Emir Humo, Elektrotehnički fakultet, Hasana Brkića 8, 71000 Sarajevo

### UREDUVAČKI ODBOR SKOPJE

Dr. Georgi Dimirovski, dr. Miodrag Brajović, dr. Vladimir Dukovski, dr. Todor Jakimov, dr. Metodija Kamilovski

Naslov na urednički odbor na spisanieto Automatika, na ruke na dr. Georgi Dimirovski, Elektrotehnički fakultet, p. fah 574, 91000 Skopje

### UREDNIČKI ODBOR SPLIT

Dr. Vlasta Zanchi, dr. Stanko Mimica, mr. Mladen Popović, dr. Petar Slapničar, mr. Mate Smajo, dr. Ratko Zanetić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Vlasta Zanchi, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovićeva b. b. 51000 Split.

### UREDNIČKI ODBOR ZAGREB

Vladimir Matijević, dr. Ramiz Abdul, dr. Zvonko Benčić, dr. Leo Budin, mr. Muamer Hamidović, mr. Marica Jurišić-Zec, dr. Božidar Vojnović, Predrag Vranić, Ivo Zgombić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke Vladimir Matijević, Uredništvo »AUTOMATIKA«, Unska ul. br. 3. 41000 Zagreb

Na osnovu mišljenja Republičkog sekretarijata za prosvjetu, kulturu i fizičku kulturu SR Hrvatske br. 788/1-1973. od 8. ožujka 1973. časopis Automatika smatra se proizvodom iz čl. 36. stava 1. točke 7. Zakona o oporezivanju proizvoda i usluga i tarifnog broja 7. stava 2. Tarife posebnog republičkog poreza na promet proizvoda, za koje se ne plaća porez na promet proizvoda.

Uređuje zaključeno: 7. 6. 1991.

# automatika

JUGOSLAVENSKI ČASOPIS ZA AUTOMATIZACIJU I INFORMATIKU

YU ISSN 0005-1144  
ATKAAF 32 (1-2), 1-64 (1991)  
UDK 681.5+681.2/3+62+67(05)=861/6=20

Godina 32-1991.  
Broj

1-2

## SADRŽAJ

- |   |    |   |
|---|----|---|
| <i>Borivoje Rajković</i>                            | 3  | Razvoj tiristorske lokomotive serije JŽ 442<br><i>prethodno saopćenje</i>   |
| <i>Slobodan Ribarić</i>                             | 13 | Izvorna shema za predstavljanje znanja<br><i>originalni znanstveni članak</i>   |
| <i>Nedjeljko Perić</i>                              | 25 | Sinteza i analiza sistema digitalnog upravljanja istosmjernim elektromotornim pogonima pomoću simetričnog optimuma<br><i>originalni znanstveni članak</i> |
| <i>Vladimir B. Bajić</i>                            | 33 | Granice odziva i stabilnosti intervalnih sistema<br><i>originalni znanstveni članak</i>   |
| <i>Darko Stipaničev</i>                             | 39 | Teorija i primjena neizrazitog unaprednog vođenja<br><i>originalni znanstveni članak</i>  |
| <i>Dragan Antić</i><br><i>Čedomir Milosavljević</i> | 47 | Regulacija objekata višeg reda regulatorima promenljive strukture sa modifikovanim Smitovim prediktorom<br><i>stručni članak</i>                          |
| <i>Dobrila Petrović</i><br><i>Radivoj Petrović</i>  | 53 | Sparta II: Dalji razvoj ekspertnog sistema za određivanje zaliha rezervnih delova<br><i>stručni članak</i>  |
|   | 60 | <b>Automatizacija u riječi i slici</b>  |

Darko Stipančević

## Teorija i primjena neizrazitog unaprednog vođenja

UDK 681.518.25  
 IFAC IA 2.4.0

Originalni znanstveni rad

Prikazane su teorijske osnove neizrazitog unaprednog vođenja procesa ostvarenog povezivanjem teorija klasičnog unaprednog vođenja i teorije neizrazitih skupova. Pokazano je kako se ideje unaprednog vođenja mogu primijeniti i u situacijama u kojima se raspolaže samo s približnim i kvalitativnim informacijama o ponašanju vođenog procesa i ili samo s približnim i procijenjenim vrijednostima poremećajnih veličina.

**Ključne riječi:** Unapredno vođenje. Neizraziti skupovi. Neizraziti model procesa. Neizrazito unapredno vođenje.

### 1. UVOD

Minimiziranje ili u idealnom slučaju eliminiranje utjecaja poremećajnih veličina koje se javljaju na materijalnim, odnosno energetske ulazima procesa jedan je od važnih ciljeva vođenja kod brojnih procesa. Takvi poremećaji obično su i mjerljivi, ali ih se na samim izvorima ne može otkloniti. Kako često procese karakterizira i spora promjenljivost, nelinearnost i postojanje znatnih vremenskih zadržki [1], nije moguće samo vođenjem pomoću povratne veze ostvariti zadovoljavajući stupanj neovisnosti izlaznih veličina o poremećajnim veličinama, odnosno postići tzv. *invarijantnost sustava u odnosu na vanjske poremećaje* [1; 2; 3]. Primjenom načela unapredne veze moguće je rješenje zadataka vođenja takvih procesa.

Idealnim, referentnim unaprednim regulatorom moguće je teorijski postići potpunu neosjetljivost izlaznih veličina sustava na vanjske poremećajne ulazne veličine. Međutim to uz mjerenje poremećajnih veličina zahtijeva i točan model sustava koji opisuje ovisnost izlaznih veličina o ulaznim poremećajnim i upravljačkim veličinama sustava. U praksi takvo idealno vođenje nije lako ostvarivo. Iako je u procesnoj industriji većina signifikantnih poremećajnih veličina mjerljiva, bilo neposredno ili posredno, postoji određeni broj procesa kod kojih se poremećajne veličine mogu odrediti samo približno i to najčešće procjenom čovjeka, voditelja ili operatera. Osim toga ponekad posebnu poteškoću predstavlja raspolaganje s dovoljno *a priori* znanja o ponašanju procesa potrebnog za postavljanje valjanog matematičkog modela. Kod ovakvih procesa primjena konvencionalnog unaprednog vođenja ne daje zadovoljavajuće rezultate.

Brojnim eksperimentima i stvarnim primjenama provedenim u posljednjih desetak godina pokazalo se da kod povratnog vođenja takvih procesa zadovolja-

vajuće rezultate vođenja daje pristup temeljen na teoriji neizrazitih skupova [4].

Uspjesi neizrazitog povratnog vođenja potakli su nas na istraživanja i rješavanje zadatka unaprednog vođenja procesa o kojima ne raspolažemo s dovoljno znanja potrebnog za postavljanje dobrog matematičkog modela i/ili samo približno poznajemo poremećajne veličine. Pri tome je povezana teorija unaprednog vođenja i teorija neizrazitih skupova u zajedničku teoriju neizrazitog unaprednog vođenja [5, 6].

U prvom dijelu rada dane su teorijske osnove neizrazitog unaprednog vođenja, a u drugom dijelu iznesena teorija ilustrirana je primjerom. Važniji pojmovi teorije neizrazitih skupova nužni za razumijevanje iznesene teorije dani su u Prilogu. Kako se ovaj rad na stanoviti način nadovezuje na rad o neizrazitom povratnom vođenju [4], osnovni pojmovi detaljno obrađeni u [4] ovdje su samo spomenuti.

### 2. PRISTUPI NEIZRAZITOM UNAPREDNOM VOĐENJU

Neizrazitom unaprednom vođenju može se pristupiti na dva različita načina, tako da se vođenje temelji na *modelu vođenog procesa*, ili da se vođenje temelji na *modelu ponašanja regulatora*.

Upravljačko djelovanje se u prvom slučaju proračunava na osnovi podataka o ulaznim poremećajnim veličinama procesa i modela procesa koji opisuju ovisnost izlaznih veličina o ulaznim poremećajnim i upravljačkim veličinama. Ovakvo vođenje je po svojoj strukturi slično klasičnom unaprednom vođenju s tom razlikom što je model procesa dan u neizrazitoj formi u obliku neizrazite relacije, a algoritam vođenja se temelji na teoriji neizrazitih relacijskih jednadžbi.

U drugom slučaju osnovni dio algoritma vođenja e postupak izbora upravljačke akcije na temelju tre-

nutnih vrijednosti poremećajnih veličina i neizrazitog modela ponašanja regulatora odnosno neizrazite relacije vođenja. Do neizrazitog modela ponašanja regulatora može se doći na dva načina. Prvi je sličan postupku neizrazitog povratnog vođenja i primjenjuje se u slučaju kad postoji čovjek operator koji raspolaže sa znanjem o vođenju i to o unaprednom vođenju procesa. Njegov postupak vođenja, najčešće dostupan samo u lingvističkoj formi u obliku pravila vođenja, matematički se formalizira i modelira neizrazitom relacijom vođenja. Kod drugog pristupa neizrazita relacija vođenja proračunava se uz pomoć matematike neizrazitih skupova na osnovi neizrazitog modela vođenog procesa, pa je ovo na neki način kombinacija postupka temeljenog na modelu vođenog procesa i modelu ponašanja regulatora. U prvom dijelu pri određivanju neizrazite relacije vođenja koriste se slični postupci proračuna kao kod metode temeljene na modelu vođenog procesa, dok se za vrijeme stvarnoga rada upotrebljavaju iste matematičke metode izbora upravljačke akcije kao kod osnovne metode temeljene na modelu ponašanja regulatora.

Dakle neizraziti unapredni regulatori mogu se podijeliti u tri grupe:

- neizrazite unapredne algoritamske regulatore u potpunosti temeljene na modelu vođenog procesa,
- neizrazite unapredne klasifikacijske regulatore u potpunosti temeljene na modelu ponašanja regulatora, i
- neizrazite unapredne algoritamsko-klasifikacijske regulatore nastale kombinacijom oba postupka.

Za sve neizrazite unapredne regulatore jedinstvena je osnovna struktura, dok se postupci sinteze i način proračuna upravljačkog djelovanja međusobno razlikuju. Zbog toga će se u slijedećem poglavlju najprije prikazati struktura regulatora i objasniti djelovanje pojedinih strukturnih cjelina zajedničkih za sve tipove neizrazitih unaprednih regulatora.

### 3. STRUKTURA NEIZRAZITOG UNAPREDNOG REGULATORA

Strukturu neizrazitog unaprednog regulatora prikazuje sl. 1.

Neizraziti unapredni regulator sastoji se od procesnog ulaznog i izlaznog međusklopa, neizrazitog ulaznog i izlaznog međusklopa i jedinice za proračun upravljačkog računanja.

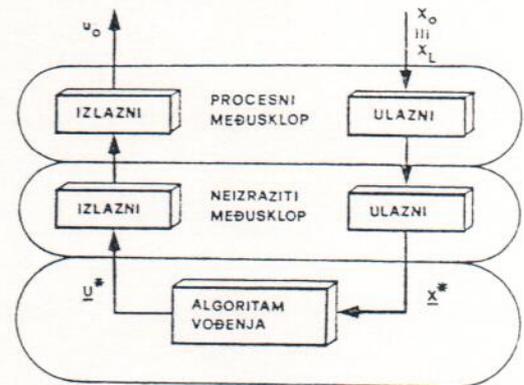
Ulazni procesni međusklop sadrži svu opremu potrebnu za mjerenje ili procjenjivanje vrijednosti varijabli potrebnih algoritmu vođenja. U slučaju teško mjerljivih varijabli procjenitelj može biti i čovjek-operator koji preko tastature unosi podatke o opaženim vrijednostima izražavajući ih u lingvističkom obliku npr.

— »gustoća smjese je vrlo velika«, ili

— »temperatura tvari procijenjena na osnovi boje je malo iznad normale«, itd.

Izlazni procesni međusklop pridružuje interpretiranoj vrijednosti neizrazitog upravljačkog djelovanja realnu vrijednost. Osim toga on sadrži svu potrebnu opremu neophodnu za primjenu upravljačkog djelovanja na stvarni upravljački ulaz procesa. U određenim slučajevima ulogu izlaznog procesnog međusklopa može obavljati i čovjek. Neizraziti regulator je tada dio sustava čovjek-stroj i njegov zadatak je predlaganje vrijednosti upravljačkog djelovanja, a na čovjeku je da savjet u predloženom obliku primijeni ili ne primijeni. Dakle neizraziti regulator je savjetnik operateru, a savjet može biti iskazan u realnoj ili jezičnoj formi npr.

- »povećaj tlak na 4,5 bara«, ili
- »smanji dotok goriva vrlo malo«.



Sl. 1. Struktura neizrazitog unaprednog regulatora

Kako nas zanimaju prvenstveno sustavi automatskog vođenja, situaciju kod koje je čovjek dio izlaznog procesnog međusklopa nećemo detaljno analizirati, dok se čovjeku ostavlja mogućnost procjenjivanja ulaznih veličina regulatora.

Podatak na izlazu ulaznog procesnog međusklopa može biti realna veličina  $x_0 \in X$  ili lingvistička veličina  $x_L$  npr. »vrlo veliko«, »pozitivno malo« itd. Zadatak ulaznog neizrazitog međusklopa koji dalje obrađuje ovu veličinu je pridruživanje vrijednostima  $x_0$  ili  $x_L$  odgovarajućeg neizrazitog skupa  $X_0^*$  ili  $x_L^*$ . Pri tome je  $X_0^*$  degenerirani neizraziti skup koji ima samo jednu vrijednost, pridružene funkcije različite od nule i jednaku jedinici ( $X_0^*(x_0) = 1$ , za ostale  $x \in X$ ,  $X_0^*(x) = 0$ ), a  $X_L^*$  je običan neizraziti skup iz  $X$ .

Zamislimo primjer: Operator preko tastature upisuje kod »PM« koji odgovara lingvističkoj vrijednosti »pozitivno mali« lingvističke varijable »promjena temperature«. Postavlja se pitanje na koji način definirati pridruženu funkciju neizrazitog skupa  $X_{PM}^*$  koji daje značenje pojmu »pozitivno mali«. Prvo što se treba definirati je podrška neizrazitog skupa  $X_{PM}^*$ , odnosno podskup skupa realnih brojeva  $X \subset \mathbb{R}$  na kojem de-

definiramo neizrazite skupove varijable »promjena temperature«. Slijedeći korak je zadavanje pridružne funkcije na primjer realnom funkcijom.

$$X_{PM}(x) = (1 + b(x - a)^2)^{-1}, \quad x \in X \quad (1)$$

gdje su  $a$  i  $b$  konstante koje određuju oblik pridružene funkcije, a definira vrijednost iz  $X$  kojoj najviše odgovara pojam »pozitivno mali«, a  $b$  položenost krivulje, odnosno preciznost pojma. Na primjer pojam »pozitivan« je manje precizan od pojma »pozitivno mali«, pa za njega  $b$  treba biti manji kako bi pridružna funkcija bila položenija. Konstante  $a$  i  $b$  potrebno je prethodno definirati za sve osnovne lingvističke vrijednosti koje se upotrebljavaju u danoj situaciji.

Do njih se dolazi istraživanjima u području industrijske psihologije (različitim metodama upitnika, ankete itd.), kako bi se što vjerodostojnije ustanovilo što za analiziranu grupu operatera i tehnologa znači pojam »promjena temperature pozitivno mala«.

Zbog praktičnih razloga, manjih zahtjeva za memorijom i veće brzine proračuna upravljačkog djelovanja svi neizraziti skupovi obično se zamjenjuju neizrazitim vektorima, a neizrazite relacije neizrazitim matricama. Pri tome je posebno zanimljiva metoda neizrazite diskretizacije [7] (vidi Prilog I) koja omogućava prikaz i realnih brojeva  $x_0 \in X$  i neizrazitih skupova  $X_L^*$  iz  $X$  neizrazitim vektorom istih dimenzija  $\underline{X}^*$ .

Na temelju ovih ulaznih podataka i algoritma vođenja u jedinici za proračun upravljačkog djelovanja formira se neizraziti vektor upravljačkog djelovanja  $U^*$ . O algoritmima vođenja bit će više govora u slijedećim poglavljima. Ovdje nas zanima koju funkciju obavlja neizraziti izlazni međusklop. Njegov prvi zadatak je rekonstrukcija neizrazitog skupa upravljačkog djelovanja  $\tilde{U}^*$  iz neizrazitog vektora  $\underline{U}^*$ . Neizraziti skup  $\tilde{U}^*$  je definiran na skupu  $U$ . Slijedeći zadatak neizrazitog izlaznog međusklopa je interpretacija neizrazitog skupa  $\tilde{U}^*$  jedinstvenom realnom vrijednošću  $u_0 \in U$  koja ga na najbolji način predstavlja. Jedan od načina interpretacije koji je korišten i u primjeru opisanom u Poglavlju 7. je metoda težista:

$$u_0 = \int_U u \tilde{U}^*(u) du / \int_U \tilde{U}^*(u) du \quad (2)$$

Kod svih neizrazitih unaprednih regulatora funkcije procesnih i neizrazitih međusklopova su iste. Razlike između regulatora postoje jedino u načinu formiranja neizrazitog vektora upravljačkog djelovanja, pa će se u slijedećim poglavljima posebno analizirati algoritmi vođenja neizrazitog unaprednog algoritamskog, klasifikacijskog i algoritamsko-klasifikacijskog regulatora.

#### 4. NEIZRAZITI UNAPREDNI ALGORITAMSKI REGULATOR

Neizraziti vektor upravljačkog djelovanja proračunava se na temelju neizrazitog modela vodenog pro-

cesa, slično kao što se kod konvencionalnog unaprednog vođenja upravljačko djelovanje proračunava na temelju determinističkog ili stohastičkog modela vodenog procesa.

Neizraziti model procesa pogodan za primjenu u unaprednom vođenju definira se kao struktura

$$M = \langle Y, U, Z, R^* \rangle \quad (3)$$

gdje su  $Y$ ,  $U$  i  $Z$  realni skupovi na kojima se definiraju neizraziti skupovi upravljanog izlaza, upravljačkog ulaza i poremećajnog ulaza, a  $R^*$  neizrazita relacija koja opisuje odnose između ulaza i izlaza procesa.

Često postoji neovisnost upravljačkog i poremećajnog djelovanja na izlaze procesa, pa se neizraziti model može prikazati strukturom

$$M = \langle Y, U, Z, R_U^*, R_Z^* \rangle \quad (4)$$

gdje su  $R_U^*$  i  $R_Z^*$  neizrazite relacije koje posebno opisuju utjecaj upravljačkog ulaza na izlaze procesa, a posebno poremećajnog ulaza na izlaze procesa.

Zadržimo se na ovom drugom slučaju. Procesne varijable obično imaju i nominalne vrijednosti  $y_N$ ,  $z_N$  i  $u_N$ . Promatra li se ponašanje procesa u okolini ovih vrijednosti, neizraziti skupovi prirasta izraza  $\Delta Y^*$  pod utjecajem prirasta ulaznih veličina ( $\Delta U^*$ ,  $\Delta Z^*$ ) mogu se proračunati neizrazitim relacijskim jednadžbama:

$$\Delta Y^* = R_U^* \circ \Delta U^* \quad (5)$$

$$\Delta Y^* = R_Z^* \circ \Delta Z^* \quad (6)$$

gdje je  $\circ$  operator max-min kompozicije (jed. I-3 u prilogu).

Neizrazite relacije  $R_U^*$  i  $R_Z^*$  određuju se postupkom neizrazite identifikacije [8, 9] na temelju rezultata mjerenja ili opažanja ponašanja procesa iskazanih skupovima uzročno-posljedičnih parova  $\{(\Delta u, \Delta y)$  i  $(\Delta z, \Delta y)\}$ . Pri tome u svakom paru vrijednosti mogu biti numeričke, lingvističke ili mješovite. Važno je naglasiti da se parovi  $(\Delta u, \Delta y)$  određuju za  $\Delta z = 0$  i to tako da se vrijednost  $\Delta y$  promatra u vremenskom trenutku  $t + \tau$  ako je  $\Delta u$  očitao u trenutku  $t$ . Kod određivanja parova  $\{(\Delta z, \Delta y)\}$  treba biti  $\Delta u = 0$  i ista vremenska razlika  $\tau$  između zapisa  $\Delta z$  i njemu odgovarajućeg  $\Delta y$ .

Neizrazite relacije  $R_U^*$  i  $R_Z^*$  osnovni su dio algoritma vođenja kojim se u svakom diskretnom trenutku vremena  $nT$  proračunava neizraziti skup upravljačkog djelovanja. Polazne jednadžbe za proračun  $\Delta U_n^*$  su jednadžbe (5) i (6). Pod utjecajem poremećajnog ulaza  $\Delta Z_n^*$  koji se pojavi u trenutku  $nT$  izlaz bi se u trenutku  $(nT + \tau)$  promijenio za iznos

$$\Delta Y_{(nT+\tau)}^* = R_Z^* \circ \Delta Z_n^* \quad (7)$$

Zadatak je odrediti neizraziti skup  $\Delta U_n^*$  koji bi primijenjen u trenutku  $nT$  promijenio izlaz u tre-

Neizraziti model procesa približiti i subjektivno (0,05); (-0,21); (0,0)

nutku ( $nT + \tau$ ) za istu tu vrijednost. Drugim riječima potrebno je jednadžbu

$$R_z^* \circ \Delta Z_n^* = R_U^* \circ \Delta U_n^* \quad (8)$$

riješiti po  $\Delta U_n^*$ .

Ako rješenje  $U_n^*$  postoji gornja granica svih rješenja proračunava se izrazom

$$\Delta U_n^* = R_U^* \ominus (R_z^* \circ \Delta Z_n^*) \quad (9)$$

gdje su  $\circ$  i  $\ominus$  operatori max-min i  $\alpha$ -kompozicije (vidi Prilog I).

Ponekad točno rješenje jednadžbe (8) ne postoji, pa se treba primijeniti aproksimacijska metoda proračuna. Jedna takva metoda razvijena posebno za primjenu algoritma neizrazitog unaprednog vođenja na malom procesnom mikroročunalu prikazana je u [6, 9].

### 5. NEIZRAZITI UNAPREDNI KLASIFIKACIJSKI REGULATOR

Način rada neizrazitog unaprednog klasifikacijskog regulatora sličan je načinu rada neizrazitog povratnog regulatora [4]. Algoritam vođenja temelji se na skupu pravila vođenja dobivenih od operatera i izraženih uzročno-posljedičnim rečenicama oblika:

»Ako je  $\Delta Z$  malo pozitivan, onda  $\Delta u$  treba biti vrlo malo negativan, također...»

Lingvističke vrijednosti modeliraju se neizrazitim skupovima, a uzročno posljedična rečenica neizrazitom relacijom implikacije. Konačan rezultat je neizrazita relacija vođenja  $G^*$  s pridruženom funkcijom  $G^*(\Delta z, \Delta u)$ .

U svakom diskretnom trenutku vremena  $nT$ , uz poznati neizraziti skup promjene poremećaja  $\Delta Z_n^*$ , kompozicijskim pravilom utjecaja (max-min kompozicija) proračunava se  $\Delta U_n^*$

$$\Delta U_n^* = G^* \circ \Delta Z_n^* \quad (10)$$

Potrebno je naglasiti da se ovaj tip regulatora primjenjuje jedino onda kad postoji čovjek-operater koji i inače u toku vođenja koristi princip unaprednog djelovanja, pa može dati skup pravila vođenja.

### 6. NEIZRAZITI UNAPREDNI ALGORITAMSKO-KLASIFIKACIJSKI REGULATOR

Za razliku od prethodnog slučaja kod kojeg se neizrazita relacija vođenja  $G^*$  dobije iz lingvističkog opisa načina vođenja, ovdje se  $G^*$  proračunava na temelju neizrazitog modela procesa.

Najprije se definira standardni niz neizrazitih skupova poremećaja  $\Delta Z_j^*$ ,  $j = 1, \dots, J$ . To može biti niz temeljnih neizrazitih skupova koji se koriste kod neizrazite diskretizacije. Primjer su neizraziti skupovi sa sl. 3, korišteni u primjeru iz Poglavlja 7.

Polazne jednadžbe za proračun  $G^*$  su izrazi (8) i (10) uz zamjenu indeksa  $n$  s indeksom  $j$ . Izraz (8)

se treba riješiti po  $\Delta U_j^*$ , a izraz (10) po  $G^*$ . Uzimajući u obzir svih  $J$  neizrazitih skupova  $\Delta Z_j^*$  gornja granica neizrazite relacije vođenja proračunava se izrazom:

$$G^* = \bigwedge_{j=1}^J \{ \Delta Z_j^* \ominus [R_U^* \circ (R_z^* \circ Z_j^*)] \} \quad (11)$$

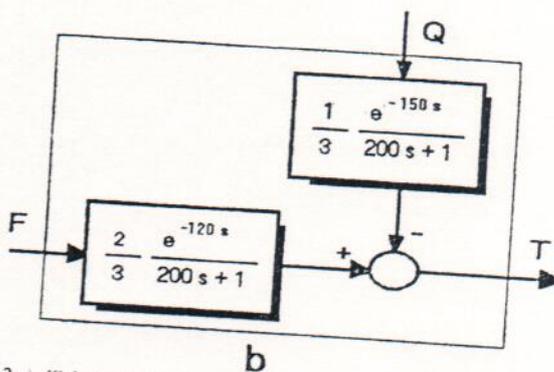
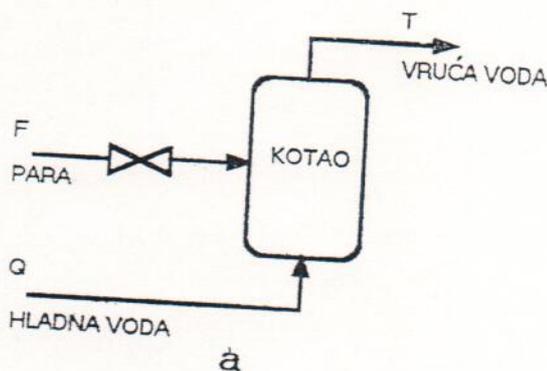
gdje je  $\bigwedge$  oznaka za operaciju minimuma.

Ako točno rješenje jednadžbe (8) ili (10) ne postoji primjenjuju se aproksimacijske metode proračuna [6, 10]. Naglasimo da one daju mogućnost proračuna donje granice rješenja, dok se gornja granica i dalje računa izrazom (11).

$G^*$  se proračunava prije samog vođenja. Za vrijeme vođenja, kao kod klasifikacijskog regulatora neizraziti skup upravljačkog djelovanja  $\Delta U_n^*$  proračunava se jednadžbom (10).

### 7. ILUSTRATIVNI PRIMJER

Principi djelovanja neizrazitog unaprednog algoritamskog i algoritamsko-klasifikacijskog regulatora prikazat će se na primjeru procesa sa sl. 2. Radi se o kotlu u kojem se zagrijava voda. Izlazna vođena veličina je temperatura  $T$ , upravljana veličina je protok pare  $F$ , a poremećajna veličina protok hladne vode  $Q$ . Nominalne vrijednosti varijabli su  $F_N = 1$ ,  $Q_N = 5$  i pretpostavljeno je da su točno poznate vremenske zadržke ulaznih signala ( $t_u = 120$  s,  $t_z = 150$  s) pa bi upravljačko djelovanje trebalo zadržavati  $t_z - t_u = 30$  s.



Sl. 2a) Tehnološki prikaz promatranog procesa, b) Matematički model procesa

Neizraziti model procesa izračunat je na temelju približnih i subjektivno opaženih parova ulazno-izlaznih vrijednosti  $\{(\Delta Q, \Delta T)\} = \{(-4,5; 0,18); (-2,1; 0,05); (-0,9; 0,15); (1,3; -0,05); (3; -0,14); (5; -0,21)\}$  i  $\{(\Delta F, \Delta T)\} = \{(-4,5; -0,42); (-2; -0,22); (-1; -0,15); (0; 0); (0,5; 0,1); (3; 0,28); (4,7; 0,43)\}$ . Do ovih rezultata se došlo na način da je proces bez vremenskih zadržki modeliran na analognom računalu, a vrijednosti su procjenjivane subjektivno na instrumentu koji je imao označenu samo nulu i maksimalne vrijednosti. Promjena izlaze varijable promatrana je 30 s nakon promjene odgovarajućeg ulaza, uz promjenu drugog ulaza jednaku nuli.

Temeljni neizraziti skupovi neizrazite diskretizacije definirani su na sl. 3, pa je svaki realni ulazno-izlazni par zamijenjen parom neizrazitih vektora.

Na taj način je omogućeno da se neizraziti model procesa prikaže dvjema neizrazitim matricama  $R_Z^*$  i  $R_T^*$ .

Stupci odgovaraju pojedinom temeljnom neizrazitom skupu sa sl. 3. promjene ulaza ( $\Delta Q$  ili  $\Delta F$ ), a reci temeljnim neizrazitim skupovima promjene izlaza  $\Delta T$ , npr.

»Ako je  $\Delta Q = PM$ , mogućnost da je  $\Delta T = NM$  je 0,3, a da je  $\Delta T = NO$  je 0,16«.

$$R_Z^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0,69 & 1 & 0,16 & 0,16 & 0 \\ 1 & 1 & 0,69 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

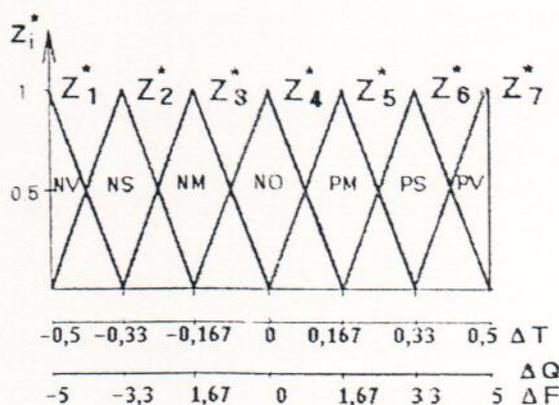
$$R_T^* = \begin{bmatrix} 0,52 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,48 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,68 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,68 & 0,42 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,58 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Algoritam vođenja programiran je na malom 8-bitnom procesnom računalu koje je spojeno s analognim računalom na kojem je modeliran vodeni proces. Kako bi se napravila usporedba neizrazitog i klasičnog unaprednog vođenja temeljenog na istim ulazno-izlaznim parovima izveden je i regresijski model procesa, te projektirano klasično unapredno vođenje.

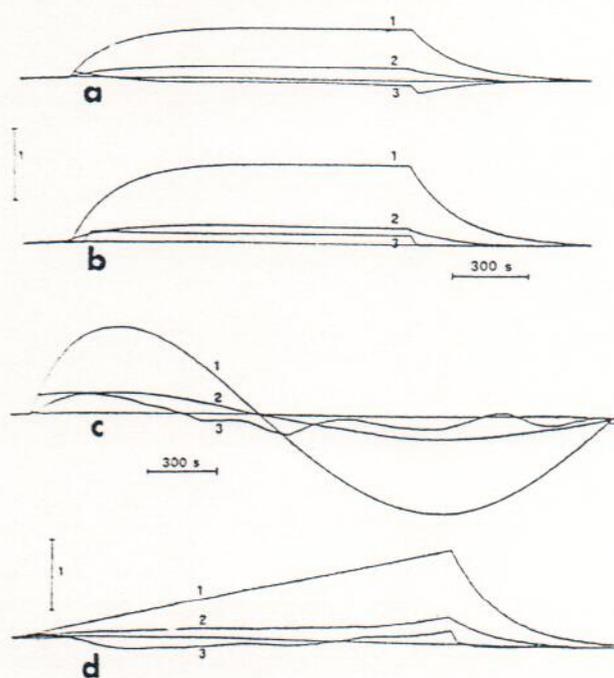
Sl. 4. prikazuje odzive procesa za različite režime vođenja i različite oblike poremećajnog signala. Idealni slučaj potpune neovisnosti izlaza o poremećaju te horizontalna linija.

Period uzimanja uzoraka bio je 19,2 s. Neizrazito vođenje dalo je bolje rezultate od klasičnog.

Sl. 5. prikazuje odzive procesa za pilasti poremećaj različito vrijeme uzimanja uzoraka.



Sl. 3. Temeljni neizraziti skupovi neizrazite diskretizacije (NV — negativno veliko, NS — negativno srednje, NM — negativno malo, NO — nula, PM — pozitivno malo, PS — pozitivno srednje, PV — pozitivno veliko)



Sl. 4. Odziv procesa bez vođenja (1) i vodenog klasičnim (2) i neizrazitim unaprednim algoritamskim regulatorom (3) za: a) impulsni poremećaj amplitude 2,5 trajanja 1400 s, b) impulsni poremećaj amplitude 4 trajanja 1400 s, c) sinusni poremećaj  $Q = 5 \cos 0,002 \cdot t$ , i d) pilasti poremećaj  $\Delta Q = 0,0028 \cdot t$  trajanja 1800 s

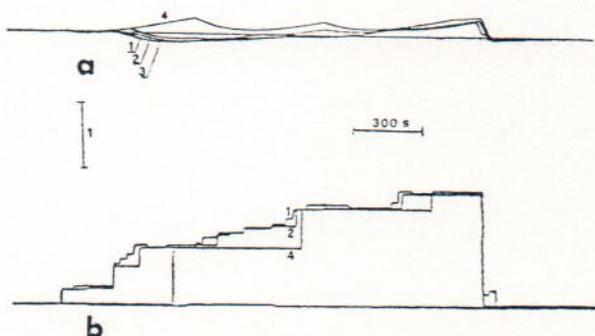
Zanimljivo je uočiti da promjena perioda uzimanja uzoraka do 300 s nema skoro nikakvog utjecaja na odziv procesa. Čak i za  $T = 560$  s odziv je zadovoljavajući iako se upravljačko djelovanje u toku trajanja poremećaja promijeni samo 4 puta.

Na kraju pogledajmo još odzive dobivene neizrazitim unaprednim algoritamsko-klasifikacijskim regulatorom. Izaberu li se za standardni niz neizrazitih skupova poremećaja  $\Delta Z_j^*$  neizraziti skupovi sa sl. 3,

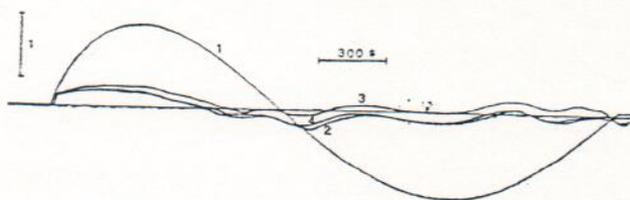
jednadžba (11) daje gornju granicu neizrazite matrice vođenja.

$$\hat{G}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0,16 & 0,16 & 0,8 \\ 1 & 1 & 0,09 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Svaki stupac odgovara neizrazitom vektoru upravljanja  $\Delta U_j^*$  za pojedini standardni  $\Delta Z_j^*$  sa sl. 3. Donja granica neizrazite matrice vođenja odstupa samo u prvom, trećem i četvrtom stupcu gdje se 1 treba u prvom stupcu zamijeniti sa 0,68, a u trećem i četvrtom sa 0,4.



Sl. 5a) Odziv procesa vođenog neizrazitim unaprednim algoritamskim regulatorom uz glatki poremećaj i vrijeme uzorkovanja  $T = 19,2 \text{ s}$  (1),  $T = 100 \text{ s}$  (2),  $T = 300 \text{ s}$  (3) i  $T = 560 \text{ s}$  (4), b) Upravljački signal



Sl. 6. Odziv procesa bez vođenja (1), vođenog neizrazitim unaprednim algoritamskim regulatorom (2) i neizrazitim unaprednim algoritamsko-klasifikacijskim regulatorom za gornju granicu (3) i donju granicu (4) matrice regulatora i kosinusni poremećaj  $\Delta Q = 5 \cos 0,002 t$

Sl. 6. prikazuje odgovarajuće odzive procesa za kosinusni poremećaj.

Period uzimanja uzoraka je bio 19,2 s. Zanimljivo je da se odzivi (4) i (2) skoro potpuno poklapaju, ali je i odziv (3) zadovoljavajući.

## 8. ZAKLJUČAK

Neizrazito unapredno vođenje čije su teorijske osnove iznesene u ovom radu nije zamjena klasičnog unaprednog vođenja, pa ga nema svrhe primjenjivati u situacijama kada se može postaviti valjan i primjenjiv deterministički ili stohastički model procesa.

Ono je nadopuna klasičnom vođenju za situacije kada su podaci na temelju kojih se treba formirati model procesa nedovoljni, neprecizni, subjektivno određeni ili izraženi lingvističkim vrijednostima i/ili se vrijednosti poremećajnih veličina mogu odrediti samo približno.

Neizrazito unapredno vođenje nastalo je povezivanjem teorije klasičnog unaprednog vođenja i teorije neizrazitih skupova. Teorija neizrazitih skupova daje matematičku osnovu za obradu približnih, kvalitativnih informacija koje mogu biti izrečene i riječima i rečenicama prirodnog jezika. Na taj način moguće je u situacijama u kojima primjena klasičnog unaprednog vođenja nije dala zadovoljavajuće rezultate, primijeniti ideje unaprednog vođenja i postići veći stupanj neovisnosti izlaza sustava o mjerljivim ili obserabilnim vanjskim poremećajima.

## ZAHVALA

Istraživanjima na području primjene teorije neizrazitih skupova pri vođenju procesa počeo sam se baviti na poticaj prof. dr. Juraja Božičevića.

Posebno su mi bile korisne naše brojne rasprave, kao i razgovori s kolegom dr. Ivicom Mandićem, na čemu im obojici zahvaljujem. U razradi programa za digitalno računalo suradili su inženjeri Tihana i Tomislav Kilić.

## PRILOG I:

### TEMELJNI POJMOVI TEORIJE NEIZRAZITIH SKUPOVA

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

$n$ -arna neizrazita relacija  $R^*$  Kartezijevog produkta  $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  običnih skupova  $X_1, X_2, \dots, X_n$  definira se kao skup uređenih parova  $R^* = \{(x_1, x_2, \dots, x_n); R^*(x_1, x_2, \dots, x_n)\}$  gdje je  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  element Kartezijevog produkta  $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ , a  $R^*(x_1, x_2, \dots, x_n)$  pridružna funkcija koja svakom  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  pridružuje jedan broj iz intervala  $[0; 1]$ .

Neka su  $A^*$  i  $B^*$  dva neizrazita skupa iz  $X$ . Unija ( $\cup$ ) i presjek ( $\cap$ ) neizrazitih skupova  $A^*$  i  $B^*$  definira se izrazima

$$C^* = A^* \cup B^* \Leftrightarrow \forall x \in X : C^*(x) = A^*(x) \vee B^*(x) \quad (I-1)$$

$$D^* = A^* \cap B^* \Leftrightarrow \forall x \in X : D^*(x) = A^*(x) \wedge B^*(x) \quad (I-2)$$

gdje  $\vee$  označava operaciju maksimuma, a  $\wedge$  operaciju minimuma.

*Max-min kompozicija* ( $\odot$ ) neizrazitog skupa  $A^*$  iz  $X_1$  i neizrazite relacije  $R^*$  iz  $X_1 \times X_2$  definira se neizrazitim skupom  $B^*$  iz  $X_2$  izrazom

$$B^* = R^* \odot A^* \Leftrightarrow \forall x_1 \in X_1 : B^*(x_2) = \bigvee_{x_1 \in X_1} [R^*(x_1, x_2) \wedge A^*(x_1)] \quad (I-3)$$

*$\alpha$ -kompozicija* ( $\ominus$ ) neizrazitog skupa  $A^*$  iz  $X_1$  i neizrazite relacije  $R^*$  iz  $X_1 \times X_2$  također se definira neizrazitim skupom iz  $X_2$ . Označimo ga sa  $C^*$  i to izrazom

$$C^* = R^* \ominus A^* \Leftrightarrow \forall x_2 \in X_2 : C^*(x_2) = \bigwedge_{x_1 \in X_1} [R^*(x_1, x_2) \wedge A^*(x_1)] \quad (I-4)$$

gdje je

$$R^*(x_1, x_2) \wedge A^*(x_1) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } R^*(x_1, x_2) \leq A^*(x_1) \\ A^*(x_1) & \text{ako je } R^*(x_1, x_2) > A^*(x_1) \end{cases} \quad (I-5)$$

*Neizrazita diskretizacija* [7] je postupak koji omogućava upotrebu i realnih i neizrazitih podataka. Sastoji se od diskretizacije podskupa realnih brojeva  $X \subset \mathbb{R}$  na seriju preklapajućih neizrazitih skupova  $Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_l^*$  tako da je cijeli  $X$  pokriven

$$\forall x \in X \exists 1 \leq i \leq l : Z_i^*(x) > 0 \quad (I-6)$$

Neizraziti skup  $A^*$  iz  $X$  može se prikazati neizrazitim vektorom sa  $l$  elemenata:

$$\underline{Z}^* = [A^*(Z_1^*) \ A^*(Z_2^*) \ \dots \ A^*(Z_l^*)] \quad (I-7)$$

gdje je  $A^*(Z_i^*)$  pridružna funkcija koja definira stupanj pripadanja temeljnog neizrazitog skupa  $Z_i^*$  neizrazitom skupu  $A^*$ . Stupanj pripadanja proračunava se izrazom

$$A^*(Z_i^*) = \bigvee_{x \in X} (Z_i^*(x) \wedge A^*(x)) \quad (I-8)$$

Lako se pokaže da za degenerirani neizraziti skup  $A^*(x)$  koji ima pridružnu funkciju različitu od nule

**Theory and application of fuzzy feedforward control.** Theoretical foundations of fuzzy feedforward control are presented. The developed approach is based on the conventional feedforward control theory and the theory of fuzzy sets. The fuzzy feedforward control can be applied in various situations, when only approximative and qualitative information about process behaviour and/or about disturbances are available and known.

**Key words:** Feedforward control. Fuzzy sets. Fuzzy process model. Fuzzy process control.

**NASLOV AUTORA:**

Dr. Darko Stipaničev  
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje  
R. Boškovića bb, 58000 Split

Primljeno: 1990-11-30.