

Analiza rasplinuto-logičkih regulatora

Mr Dragan Z. Šaletić, dipl.inž.¹⁾

Razmatra se primena teorije rasplinitih skupova i ekspertskih sistema u automatskom upravljanju. Softverski je realizovan rasplinuto-logički regulator PD tipa i kroz eksperimente upoređene su njegove performanse sa performansama odgovarajućeg konvencionalnog regulatora. Dati su elementi za sagledavanje praktične primenljivosti teorije rasplinitih skupova i ekspertskih sistema u upravljanju. Opisani su elementi projektovanja rasplinuto-logičkih regulatora. Istaknuti su problemi koji predstavljaju otvorene istraživačke oblasti.

Ključne reči: Računarska tehnika, automatika, meko računarstvo, ekspertski sistemi, rasplinuta logika.

Korišćene oznake i simboli

x	– element skupa;
\in	– simbol pripadnosti skupu;
$:=$	– jednako po definiciji;
$[a, b]$	– segment od a do b , uključivo i a i b ;
$\mu_A(x)$	– stepen pripadnosti elementa x rasplinitom skupu A ;
S	– skup;
\neg	– negacija;
\wedge	– konjunkcija;
\vee	– disjunkcija;
\rightarrow	– implikacija;
$\dot{e} := \frac{de}{dt}$	– prvi izvod e po vremenu;
Agg	– oznaka operatora agregacije;
\circ	– operator kompozicionog pravila zaključivanja;
$\ddot{e} := \frac{d^2e}{dt^2}$	– drugi izvod e po vremenu;
$\{z \dots\}$	– skup elemenata z .

Uvod

RASPLINUTO upravljanje je veoma interesantna istraživačka oblast, što potvrđuje i veliki broj objavljenih radova iz ove oblasti, veliki broj časopisa, knjiga, skupova, koji se bave ovom disciplinom. Cilj ovog rada je da izloži rezultate istraživanja rasplinitog upravljanja u delu njegove primene na rasplinuto-logičke regulatore. Analiza treba da odgovori na sledeća pitanja: šta su rasplinuto-logički regulatori, kako oni funkcionišu, i koliko su praktično primenljivi?

Rasplinuto upravljanje je jedna od inženjerskih primena rasplinitih ekspertskih sistema zasnovanih na pravilima. Ekspertski sistem, [1,2], je računarski program koji otelotvoruje znanje i metode rasuđivanja radi rešavanja problema toliko teških da, inače, njihovo rešavanje zahteva usluge stručnjaka. Za rasplinuto-logičke regulatore od interesa je predstavljanje znanja u ekspertskom sistemu u obliku AKO-ONDA pravila izvođenja :

AKO (je zadovoljen skup uslova) ONDA (se može zaključiti skup posledica) (1)

Rasplinuti ekspertski sistem se odlikuje predstavljanjem znanja rasplinitim pravilima izvođenja, zasnovanim na teoriji rasplinitih skupova.

Zadeh [3] uvodi i definiše rasplinuti skup* preko funkcije pripadnosti, pri čemu je stepen pripadnosti broj čija je vrednost između 0 i 1. Rasplinuti skup se definiše na domenu razmatranja.

Domen razmatranja je skup posmatranih elemenata. Određivanje stepena pripadnosti elementa iz domena razmatranja rasplinitom skupu nije formalno definisano, to određivanje može biti subjektivno. Element (tačka) rasplinitog skupa, zajedno sa svojom vrednošću pripadnosti rasplinitom skupu, naziva se rasplinuti *singleton* (jednoelementni skup). Rasplinuti skup se posmatra kao kolekcija parova elemenata nekog podskupa domena razmatranja i njima pridruženih vrednosti pripadnosti.

Osnovne operacije (presek, unija, komplement) nad rasplinitim skupovima, [3,4,5], definišu se preko funkcija pripadnosti rasplinitih skupova. Ovim operacijama nad rasplinitim skupovima može se pridružiti viševrednosna logika sa vrednošću istinitosti u $[0,1]$. Rasplinuta logika se zasniva na rasplinitim skupovima na isti način na koji se Bulovska logika zasniva na Kantorovim skupovima. U Zadehovo interpretaciji [3], za definicije komplementa, preseka i unije, standardne definicije rasplinite logike za negaciju, konjunkciju i disjunkciju, respektivno, su:

$$\begin{aligned} I(\neg x) &= 1 - I(x) \\ I(x \wedge y) &= \min\{I(x), I(y)\} \\ I(x \vee y) &= \max\{I(x), I(y)\} \end{aligned} \quad (2)$$

pri čemu su: x, y - elementi iz skupa S , domena razmatranja; I - funkcija pripadnosti (istinitosti) rasplinitog podskupa F domena razmatranja S , najčešće u teoriji rasplinitih

*engl. *fuzzy set*, kod nas se koriste i termini: skup mutnosti, fuzzy skup

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

skupova označena sa $\mu_F(x)$; to je stepen istinitosti suda "x je u F".

U rasplinutoj logici, stepen sa kojim je istinit sud "x je u F" određen je uređenim parom $\{x, \mu_F(x)\}$, $\mu_F(x) \in [0,1]$. Bulovske vrednosti istinitosti u binarnoj logici su u rasplinutoj logici zamenjene stepenima istinitosti čiji zbir nije nužno jednak jedinici. Kada se vrednosti istinitosti iz rasplinite logike svedu na vrednosti 0 i 1, onda se funkcije pripadnosti svode na njihove Bulovske parnjake – karakteristične funkcije (princip proširenja, Zadeh [6]). Rasplinuta logika predstavlja račun kompatibilnosti.

Do sada, rasplinuta logika je najuspešnije primenjena u rasplinuto-logičkim regulatorima. Praktično korišćenje rasplinuto-logičkog upravljanja zahteva programsko okruženje kao osnovnu podršku obrazovanju baze znanja. Suštinski deo rasplinuto-logičkih regulatora je skup jezičkih upravljačkih pravila izvođenja*. Zato se, uobičajeno, rasplinuto-logičko upravljanje razmatra u okviru onog dela računarske tehnike, koji se naziva mekim računarstvom.

Meko računarstvo** je oblast računarske tehnike u kojoj se ostvaruje komplementarno partnerstvo istraživačko-razvojnih oblasti i tehnika rasplinite logike, ekspertskih sistema, neuralnih mreža, verovatnosnog rasuđivanja, mreža verovanja, genetskih algoritama, teorije haosa i delova teorije obučavanja. Svaka od ovih disciplina i tehnika daje metode rešavanja složenih problema u projektovanju inteligentnih sistema sa sposobnošću korišćenja tolerancije nepreciznosti, neizvesnosti i delimične istinitosti, da bi se ostvarila adaptibilnost, robusnost i ekonomičnost rešenja.

Približno rasuđivanje, [7], koje je zasnovano na teoriji rasplinitih skupova, omogućava realizovanje rasuđivanja korišćenjem rasplinitih i neizvesnih koncepata u ekspertskim sistemima. Primena teorije rasplinitih skupova u ekspertskim sistemima omogućava predstavljanje znanja i zaključivanje, koji su bliži načinu na koji čovek izražava svoje znanje i na koji rasuđuje, nego u slučaju konvencionalnih ekspertskih sistema. Rasplinuta logika se bavi kvantifikacijom i rasuđivanjem o nejasnim ili rasplinitim terminima. Ovi termini nazivaju se jezičkim (rasplinitim) promenljivima. Raspliniti sud je smisleni iskaz u kome se javlja jezička promenljiva i kome se može dodeliti vrednost istinitosti iz domena [0,1]. Raspliniti ekspertski sistemi odlikuju se predstavljanjem znanja rasplinitim pravilima. Rasplinuto pravilo daje informaciju o jezičkoj promenljivoj u rasplinitom sudu u ONDA delu pravila na osnovu jezičke promenljive u rasplinitom sudu u AKO delu pravila. Pravilo izvođenja (zaključaka) rasplinitih ekspertskih sistema može se, matematički, posmatrati kao implikacija. Zaključivanje u rasplinuto-logičkim regulatorima se vrši na osnovu baze znanja, korišćenjem rasplinite implikacije. Koristi se pravilo zaključivanja koje predstavlja uopštenje modus ponens pravila iz tradicionalne logike, a zasnovano je na korišćenju kompozicionog pravila zaključivanja [8].

Pošto su u uvodnom delu naznačeni osnovni pojmovi teorije rasplinitih skupova, u sledećem poglavlju ukratko će biti opisani regulatori, uopšte. Potom se objašnjavaju glavne ideje rasplinuto-logičkih regulatora. Metodi izoštavanja se razmatraju u posebnom delu, kao i mehanizmi zaključivanja. Iako (još uvek) nema sistematskog postupka projektovanja rasplinuto-logičkih regulatora, razmatrani su elementi njihovog projektovanja. Implementiran je rasplinuto--logički regulator PD tipa i

kroz eksperimente upoređene su njegove performanse i performanse odgovarajućeg konvencionalnog regulatora. Opisane su poznate primene rasplinuto-logičkih regulatora, uopšte. Dati su zaključci.

Rad je zasnovan na istraživanju teorijskih osnova i metoda, na osnovu čega su izvršene računarske simulacije na modelu realizovanom u MATLAB-u na personalnom računaru pod Windows 98 operativnim sistemom.

U literaturi su navedene reference korišćene u ovom radu, detaljniji pregled referenci iz razmatrane oblasti može se naći u [9,10].

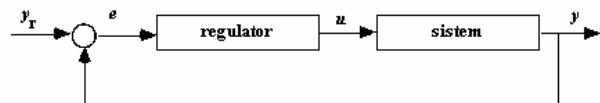
Regulatori

Konvencionalni regulatori se izvode na osnovu metoda teorije upravljanja sistemima zasnovanih na matematičkim modelima procesa sa otvorenom petljom, koji se nazivaju *sistemima*, i kojima se želi upravljati, [11].

Svrha regulatora sa povratnom spregom je da garantuje željeni odziv izlaza objekta (procesa) upravljanja y , sl.1. Proces u kome se vrednost izlaza y održava u blizini vrednosti referentnog ulaza y_r , uprkos prisustvu poremećaja sistemskih parametara i grešaka merenja, naziva se regulacijom. Izlaz regulatora (koji predstavlja ulaz u sistem) je upravljačka akcija u . Opšti oblik zakona upravljanja u diskretnom vremenu je :

$$u(k) = f(e(k), e(k-1), \dots, e(k-\tau), u(k-1), \dots, u(k-\tau)) \quad (3)$$

i određuje upravljačku akciju koja opisuje odnos između ulaza i izlaza regulatora. Oznaka e u izrazu (3) predstavlja grešku, odstupanje vrednosti izlaza sistema y od željene vrednosti referentnog ulaza y_r ; parametar τ definiše red regulatora, k označava k -ti odbirak vremena, a f je, u opštem slučaju, nelinearna funkcija.



Slika 1. Osnovni sistem upravljanja na osnovu povratne sprege

Iz zakona upravljanja (3) mogu se izvesti različiti upravljački algoritmi: proporcionalni (P), integralni (I), diferencijalni (D) (izvodni), i njihove kombinacije, a za razne vrednosti parametra τ i za različite funkcije f .

Najopštiji konvencionalni proporcionalno-integralno-diferencijalni (PID) regulator opisuje se funkcijom:

$$u(t) = K_p e + K_I \int_0^t e dt + K_D \dot{e} = \int_0^t (K_p \dot{e} + K_I e + K_D \ddot{e}) dt \quad (4)$$

gde su: K_p - konstanta proporcionalnosti, K_D - diferencijalna konstanta, a K_I - integralna konstanta, sve tri definisane karakteristikama procesa, \dot{e} , \ddot{e} - prvi i drugi izvod signala greške po vremenu t .

Kod diskretnog PID regulatora zakon upravljanja se formira na osnovu signala greške $e(kT)$, signala promene greške $ce(kT) = (e(kT) - e((k-1)T))/T$ i numerički aproksimiranog integrala greške $ie(kT) = ie((k-1)T) + Te((k-1)T)$, gde je T perioda odabiranja. Upravljački zakon diskretnog PID regulatora je:

* engl. *production rule*

** engl. *soft computing*

$$u_{PID}(kT) = K_p \cdot e(kT) + K_D \cdot ce(kT) + K_I \cdot ie(kT) \quad (5)$$

Za linearni proces konstante K_p , K_D , i K_I se određuju tako da je sistem u zatvorenoj petlji stabilan, tj. vrši se podešavanje PID parametara. Konvencionalni PID regulatori su se pokazali uspešnim i u slučaju nelinearnih procesa koji se mogu linearizovati oko radne tačke.

Rasplinuto-logički regulatori

Ideju o formulisanju upravljačkog algoritma logičkim pravilima uveo je Zadeh, [8]. Ovu ideju prvi su realizovali Mamdani i sar. [12].

Dinamičko ponašanje rasplinutog sistema u rasplinuto-logičkom regulatoru (RLR*), okarakterisano je skupom jezičkih opisnih pravila zasnovanih na stručnom znanju. Uzrocima i posledicama ovih AKO-ONDA pravila pridruženi su rasplinuti pojmovi (jezički termini). U terminologiji rasplinuto-logičkih regulatora, *rasplinuto pravilo upravljanja*** čine rasplinite uslovne tvrdnje kod kojih je uzrok, uslov u AKO delu pravila, uslov u svom domenu, a posledica, uslov u ONDA delu pravila u svom domenu, je upravljačka akcija za sistem kojim se upravlja.

Rasplinita pravila daju pogodan način izražavanja upravljanja i znanja u oblasti. Kada je u uzroke i posledice ovih pravila uključeno više jezičkih promenljivih, sistem se naziva rasplinitim sistemom sa više ulaza i više izlaza (VUVI***). Na primer, u slučaju rasplinitog sistema sa više (dva) ulaza i jednim izlazom (VUI****), rasplinita pravila upravljanja imaju oblik:

$$\begin{aligned} P_1: & \text{ ako } x \text{ je } A_1 \text{ i } y \text{ je } B_1 \text{ onda } z \text{ je } C_1 \\ P_2: & \text{ ako } x \text{ je } A_2 \text{ i } y \text{ je } B_2 \text{ onda } z \text{ je } C_2 \\ & \dots \\ P_n: & \text{ ako } x \text{ je } A_n \text{ i } y \text{ je } B_n \text{ onda } z \text{ je } C_n \end{aligned} \quad (6)$$

gde su: x i y - promenljive stanja procesa, z - upravljačka promenljiva, A_i , B_i , C_i - jezičke vrednosti jezičkih promenljivih x , y , i z u domenima razmatranja U , V , i W , respektivno, a implicitni veznik pravila, *takođe*, povezuje pravila u skup pravila (bazu pravila, bazu znanja). Baza znanja (6) je za potrebe ovog rada, predstavljena skraćeno sledećim izrazom:

$$P_i: \text{ ako } x \text{ je } A_i \text{ i } y \text{ je } B_i \text{ onda } z \text{ je } C_i, i=1, \dots, n \quad (6a)$$

RLR se može predstaviti u obliku sličnom konvencionalnom zakonu upravljanja (3), izraz (7):

$$u(k) = \Phi(e(k), e(k-1), \dots, e(k-\tau), u(k-1), \dots, u(k-\tau)) \quad (7)$$

u kome je funkcija Φ opisana rasplinitom bazom znanja. Izraz (7) ne sadrži neku vrstu funkcije prenosa ili diferencijalne jednačine. Priroda RLR je da je zasnovan na znanju, i ona diktira ograničenju upotrebu ranijih vrednosti greške e i upravljanja u , jer nije opravdano očekivati da postoje jezičke tvrdnje za $e(k-3)$, $e(k-4)$, ..., $e(k-\tau)$, koje imaju neko smisljeno značenje. Tipični RLR opisuje relaciju između promene upravljanja:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

s jedne strane, i greške $e(k)$ i njene promene:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

s druge strane. Takav zakon upravljanja se može formalizovati kao:

$$\Delta u(k) = \Phi(e(k), \Delta e(k)) \quad (8)$$

i predstavlja opšti izraz za RLR (7), u kome je $\tau=1$. Stvarni izlaz regulatora $u(k)$ dobija se na osnovu prethodne vrednosti upravljanja $u(k-1)$ koja se popravljiva dodavanjem $\Delta u(k)$:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

Ovaj tip regulatora su prvi predložili Mamdani i Assilian 1975. god., [12], i naziva se rasplinuto-logički regulator *Mamdanijevog tipa*.

Primer baze znanja jednostavnog RLR, kojom se realizuje upravljački zakon (8), dat je sledećim pravilima, sl.2, za promenljivu e , a analogno je i za promenljive Δe i Δu :

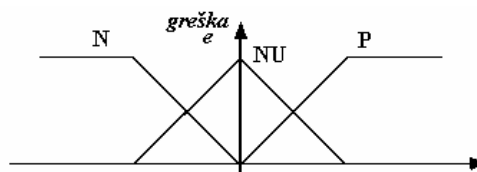
P₁: Ako e je "pozitivno" i Δe je "blisko nuli" onda Δu je "pozitivno"

P₂: Ako e je "negativno" i Δe je "blisko nuli" onda Δu je "negativno"

P₃: Ako e je "blisko nuli" i Δe je "blisko nuli" onda Δu je "blisko nuli"

P₄: Ako e je "blisko nuli" i Δe je "pozitivno" onda Δu je "pozitivno"

P₅: Ako e je "blisko nuli" i Δe je "negativno" onda Δu je "negativno"



Slika 2. Funkcije pripadnosti za promenljivu greška, e : N-"negativno", NU - "blisko nuli", P - "pozitivno"

Zadatak je, u opštem slučaju (6a), naći jasnu upravljačku akciju z_0 korišćenjem rasplinite baze znanja i na osnovu stvarnih jasnih ulaza x_0 i y_0 :

P_i: ako x je A_i i y je B_i onda z je C_i , $i=1, \dots, n$
ulaz x je x_0 i y je y_0

izlaz z_0

Ulazne vrednosti u bazu znanja koju čine rasplinita pravila treba da budu date rasplinitim skupovima, i zato se uvodi rasplinitost***** u jasne ulaze. Izlaz iz rasplinitog sistema je raspliniti skup. Da bi se dobila jasna vrednost izlaza (jasno upravljanje), izlazni raspliniti skup mora se podvrći izoštravanju*****.

* Kod nas se RLR naziva i fazi kontroler [13], (engl. *fuzzy controller*)

** engl. *fuzzy control rule*.

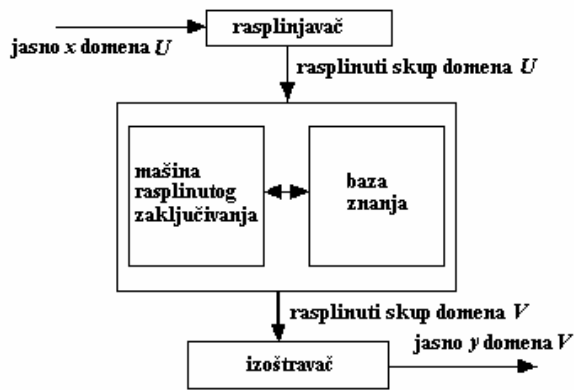
*** engl. *Multiple Input Multiple Output*.

****engl. *Multiple Input One Output*.

***** engl. to fuzzify

*****engl. to defuzzify

Rasplinuto-logički regulator čini četiri glavna dela: spreznik rasplinjavanja, baza znanja koju čine rasplinuta pravila, mašina rasplinutog zaključivanja i spreznik izoštravanja, sl.3.

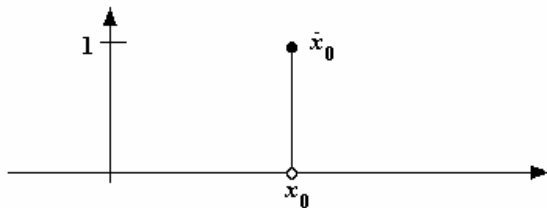


Slika 3. Rasplinuto-logički regulator

Operator rasplinjavanja transformiše jasne ulazne podatke u rasplinite skupove. U najvećem broju slučajeva, rasplinitost se uvodi korišćenjem rasplinitih singltona. Raspliniti singleton je raspliniti skup \bar{x}_0 , koji čini jedna tačka x_0 iz domena razmatranja i važi $\mu_{\bar{x}_0}(x_0) = 1$, sl.4. Simbolički

$$\text{rasplinjavač}(x_0) := \bar{x}_0,$$

gde je x_0 jasna ulazna vrednost procesa, \bar{x}_0 je raspliniti skup, a *rasplinjavač* predstavlja operator rasplinjavanja.



Slika 4. Raspliniti singleton

Ako se imaju dve ulazne promenljive x i y , i -to rasplinito pravilo upravljanja:

$$P_i: \text{ ako } (x \text{ je } A_i \text{ i } y \text{ je } B_i) \text{ onda } (z \text{ je } C_i)$$

implementira se *rasplinitom implikacijom* R_i i definiše na sledeći način:

$$\mu_{R_i}(u, v, w) = [\mu_{A_i}(u) \text{ i } \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w)$$

pri čemu se logički veznik i implementira Dekartovim proizvodom, tj.:

$$\begin{aligned} [\mu_{A_i}(u) \text{ i } \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w) &= \\ &= [\mu_{A_i}(u) \times \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w) = \\ &= \min\{\mu_{A_i}(u), \mu_{B_i}(v)\} \rightarrow \mu_{C_i}(w) \end{aligned}$$

RLR se sastoji od skupa rasplinitih pravila upravljanja, (6a). Da bi se dobio izlaz z na osnovu datog stanja procesa x , y i rasplinite relacije R_i koja odgovara pravilu P_i , primenjuje se kompoziciono pravilo zaključivanja, Zadeh

[8]:

P_i : ako x je A_i i y je B_i onda z je C_i , $i = 1, \dots, n$
činjenica: x je \bar{x}_0 i y je \bar{y}_0

posledica: z je C

gde se posledica izračunava na osnovu izraza:

$$\text{posledica} = \text{Agg}(\text{činjenica} \circ P_1, \dots, \text{činjenica} \circ P_n),$$

odnosno,

$$C = \text{Agg}(\bar{x}_0 \times \bar{y}_0 \circ R_1, \dots, \bar{x}_0 \times \bar{y}_0 \circ R_n)$$

Uzevši u obzir da su: $\mu_{\bar{x}_0}(u) = 0, u \neq x_0$ i $\mu_{\bar{y}_0}(v) = 0, v \neq y_0$, izračunavanje funkcije pripadnosti posledice C vrši se na osnovu izraza:

$$\begin{aligned} \mu_C(w) &= \text{Agg}\{\mu_{A_i}(x_0) \times \mu_{B_i}(y_0) \rightarrow \\ &\rightarrow \mu_{C_1}(w), \dots, \mu_{A_n}(x_0) \times \mu_{B_n}(y_0) \rightarrow \mu_{C_n}(w)\} \end{aligned} \quad (9)$$

za svako $w \in W$, i uz postojanje mogućnosti izbora operatora **Agg** i \rightarrow , u skladu sa interpretacijom rasplinitog pravila. Prema različitim mogućim interpretacijama rasplinitog pravila, moguće je realizovati više mehanizama zaključivanja, što će se razmatrati u nastavku teksta.

Metodi izoštravanja

Izlaz procesa zaključivanja posle modula koji sadrži mašinu rasplinitog zaključivanja i bazu znanja, sl.3, je raspliniti skup C , koji specificira raspodelu mogućnosti (funkciju pripadnosti) upravljačke akcije. U upravljanju u realnom vremenu, obično se zahteva jasna akcija. Dakle, rasplinita upravljačka akcija (izlaz) dobijena rasplinitim algoritmom upravljanja mora se izoštriti, predstaviti jednom jasnom vrednošću:

$$z_0 = \text{izoštravač}(C)$$

gde je z_0 jasan upravljački izlaz, a *izoštravač* je operator izoštravanja.

*Izoštravanje** je proces izbora elementa predstavljanja iz rasplinitog izlaza C dobijenog rasplinitim algoritmom upravljanja.

Najčešće korišćeni metodi izoštravanja su:

Centar težina** Vrednost izoštravanja rasplinitog skupa C definisana je kao rasplinito težište tog skupa, za konačan domen razmatranja W i diskretnu funkciju pripadnosti $\mu_C(w)$:

$$z_0 = \frac{\sum z_j \mu_C(z_j)}{\sum \mu_C(z_j)} \quad (10)$$

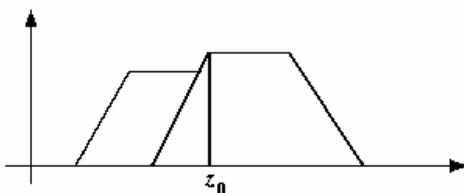
U kontinualnom slučaju, sume su zamenjene integralima.

Prvi od maksimizirajućih. Vrednost izoštravanja rasplinitog skupa C je najmanji element za koji taj skup ima maksimalnu vrednost, sl.5:

$$z_0 = \min\left\{z \mid \mu_C(z) = \max_w \mu_C(w)\right\} \quad (11)$$

* engl. defuzzification

**[13], centar mase; engl. centroid method; center-of-gravity



Slika 5. Metod izoštavanja "prvi od maksimizirajućih"

Srednji od maksimizirajućih*. Vrednost izoštavanja diskretnog rasplinutog skupa C definiše se kao srednja vrednost svih vrednosti domena razmatranja, za koje je stepen pripadnosti maksimalan:

$$z_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j \quad (12)$$

gde je $\{z_1, \dots, z_N\}$ skup elemenata domena W za koje μ_C dobija maksimalnu vrednost. Ako C nije diskretan skup, onda je izoštrena vrednost rasplinutog skupa C definisana kao:

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz} \quad (13)$$

gde G označava skup elemenata za koje μ_C ima maksimalnu vrednost.

Max kriterijum. Ovim metodom se bira proizvoljna vrednost iz skupa maksimizirajućih elemenata skupa C , odnosno:

$$z_0 \in \left\{ z \mid \mu_C(z) = \max_w \mu_C(w) \right\} \quad (14)$$

Izoštavanje visine. Potpuno se odbacuju oni elementi domena razmatranja W , koji imaju stepene pripadnosti manje od nekog nivoa α , a vrednost izoštavanja z_0 izračunava se primenom metoda centar-oblasti na one elemente skupa W koji imaju stepene pripadnosti ne manje od α .

$$z_0 = \frac{\int_{[C]^\alpha} z \mu_C(z) dz}{\int_{[C]^\alpha} \mu_C(z) dz} \quad (15)$$

gde $[C]^\alpha$ označava skup α -nivoa skupa C : $[C]^\alpha = \{z \mid \mu_C(z) \geq \alpha\}$, $\alpha \in [0, 1]$.

Mehanizmi zaključivanja

U okviru bloka označenog kao mašina rasplinutog zaključivanja, sl.3, u rasplinuto-logičkim regulatorima koristi se (najčešće) jedan od četiri mehanizma zaključivanja**. Ti mehanizmi se ilustruju na jednostavnoj bazi znanja koju čine dva rasplinuta pravila upravljanja

oblika:

$$\begin{aligned} P_i: & \text{ ako } x \text{ je } A_i \text{ i } y \text{ je } B_i \text{ onda } z \text{ je } C_i, i=1,2 \\ \text{činjenica:} & \quad x \text{ je } \bar{x}_0 \text{ i } y \text{ je } \bar{y}_0 \end{aligned} \quad (16)$$

posledica: $z \text{ je } C$

1. Mamdanijev mehanizam zaključivanja, [12].

Rasplinuta implikacija se modeluje Zadehovim-Mamdanijevim operatorom minimum, a veznik pravila *takođe* interpretira se kao veznik *ili* i definiše operatorom maksimum.

Nivoi aktiviranja pravila, koji se označavaju sa α_i , $i=1,2$, izračunavaju se na osnovu izraza:

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0), \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$$

Izlazi pojedinih pravila dati su izrazima:

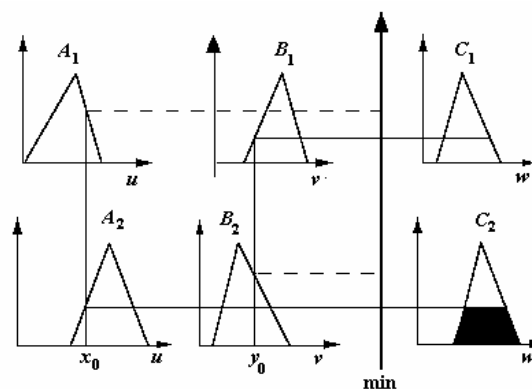
$$\mu_{C_1}(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(w)), \quad \mu_{C_2}(w) = (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(w))$$

Izlaz celog sistema, izraz (9), u slučaju Mamdanijevog mehanizma zaključivanja je:

$$\mu_C(w) = \mu_{C_1}(w) \vee \mu_{C_2}(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(w)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(w))$$

Da bi se dobila deterministička upravljačka akcija, koristi se bilo koji metod izoštavanja.

Na sl.6 je prikazana grafička interpretacija zaključivanja korišćenjem Mamdanijevog operatora implikacije, za dva pravila.



Slika 6. Zaključivanje korišćenjem Mamdanijevog operatora implikacije, za trougaone funkcije pripadnosti razmatranih rasplinutih skupova

2. Tsukamotov mehanizam zaključivanja, [14]. Za sve jezičke termine se pretpostavlja da imaju monotone funkcije pripadnosti. Nivoi aktiviranja pravila, u oznaci α_i , $i=1,2$, izračunavaju se na osnovu izraza:

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0), \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$$

Pojedine jasne upravljačke akcije z_1 i z_2 izračunavaju se iz jednačina

$$\alpha_1 = \mu_{C_1}(z_1), \quad \alpha_2 = \mu_{C_2}(z_2)$$

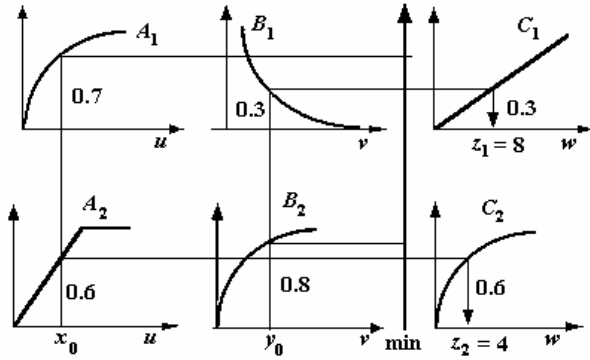
a ukupna jasna upravljačka akcija izražena je preko metoda centar težina, (10):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

* [13], centar maksimuma; engl. *average-of-maxima*; ili *middle-of-maxima*
**engl. *inference mechanisms*

Na primer, za (16), i, prema sl.7, za: $\mu_{A_1}(x_0) = 0.7, \mu_{B_1}(y_0) = 0.3$, ima se: nivo aktiviranja prvog pravila $\alpha_1 = \min\{\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)\} = \min\{0.7, 0.3\} = 0.3$.

Iz $\mu_{A_2}(x_0) = 0.6, \mu_{B_2}(y_0) = 0.8$ sledi da je nivo aktiviranja drugog pravila $\alpha_2 = \min\{\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)\} = \min\{0.6, 0.8\} = 0.6$. Izlazi pojedinačnih pravila $z_1=8$ i $z_2=4$ izvode se iz jednačina $\mu_{C_1}(z_1) = 0.3, \mu_{C_2}(z_2) = 0.6$, a jasna upravljačka akcija je $z_0=(8 \times 0.3 + 4 \times 0.6)/(0.3 + 0.6) = 5.3$.



Slika 7. Mehhanizam zaključivanja Tsukamota

3. Mehhanizam zaključivanja Sugeno-Takagija, [15]. Sugeno i Takagi koriste sledeći oblik pravila:

P_i : ako x je A_i i y je B_i onda $z_i = a_i x + b_i y, i = 1, 2$
 činjenica: x je \bar{x}_0 i y je \bar{y}_0

posledica: z_0

Nivoi aktiviranja pravila se izračunavaju na osnovu izraza

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0), \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$$

Izlazi pojedinih pravila se izvode na osnovu relacija: $z_1^* = a_1 x_0 + b_1 y_0, z_2^* = a_2 x_0 + b_2 y_0$.

Jasna upravljačka akcija izražava se u sledećem obliku:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Na primer, za

P_1 : ako x je VELIKO i y je MALO onda $z_1 = x + y$
 P_2 : ako x je SREDNJE i y je VELIKO onda $z_2 = 2x - y$
 činjenica: x je \bar{x}_0 i y je \bar{y}_0

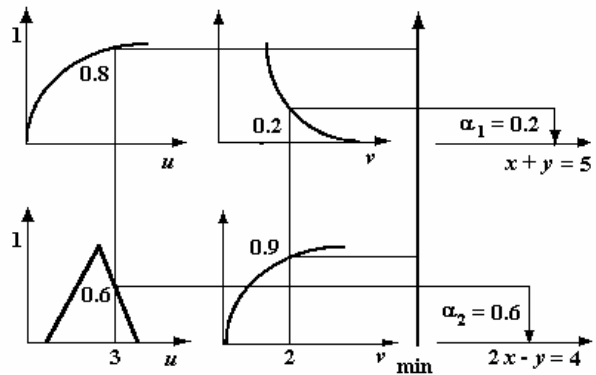
posledica: z_0

i za, sl.8, $x_0=3, y_0=2, \mu_{VELIKO}(x_0) = 0.8, \mu_{MALO}(y_0) = 0.2$, nivo aktiviranja prvog pravila je $\alpha_1 = \min\{\mu_{VELIKO}(x_0), \mu_{MALO}(y_0)\} = \min\{0.8, 0.2\} = 0.2$.

Iz $\mu_{SREDNJE}(x_0) = 0.6, \mu_{VELIKO}(y_0) = 0.9$ nivo aktiviranja drugog pravila je $\alpha_2 = \min\{\mu_{SREDNJE}(x_0), \mu_{VELIKO}(y_0)\} = \min\{0.6, 0.9\} = 0.6$. Izlazi pojedinačnih pravila izračunavaju se na sledeći način:

$$z_1^* = x_0 + y_0 = 3 + 2 = 5, \quad z_2^* = 2x_0 - y_0 = 2 \times 3 - 2 = 4,$$

a jasna upravljačka akcija je $z_0=(5 \times 0.2 + 4 \times 0.6)/(0.2 + 0.6) = 4.25$.



Slika 8. Sugeno-Takagijev mehanizam zaključivanja

4. Larsenov mehanizam zaključivanja. Rasplinuta implikacija se modeluje Larsenovim operatorom proizvoda, a veznik pravila *takođe* interpretira se kao veznik *ili* i definiše se operatorom max. Neka je α_i nivo aktiviranja i -tog pravila, $i = 1, 2$, pa je:

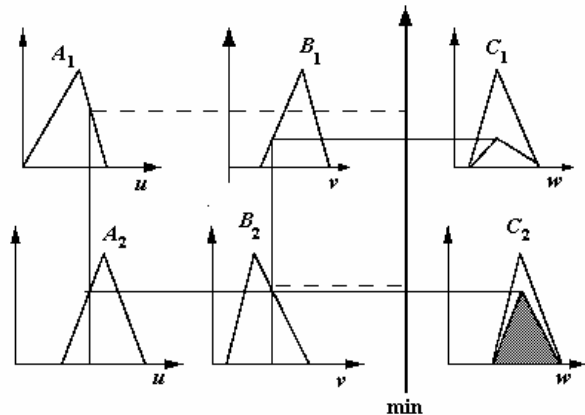
$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0), \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$$

Funkcija pripadnosti izvedene posledice C je tačkasta i data je izrazom:

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \mu_{C_1}(w)) \vee (\alpha_2 \mu_{C_2}(w))$$

Za dobijanje determinističke upravljačke akcije, može se upotrebiti bilo koja strategija izoštavanja.

Na sl.9 je prikazana grafička interpretacija zaključivanja, korišćenjem Larsenovog operatora implikacije, za dva pravila.



Slika 9. Zaključivanje korišćenjem pravila sa Larsenovim operatorom proizvoda

Projektovanje rasplinuto-logičkog regulatora

Osnovni projektantski izbori u projektovanju rasplinuto-logičkih regulatora odnose se na sledeće elemente:

- 1) konfiguraciju regulatora;
- 2) domene razmatranja, njihova priroda (kontinualni/diskretni), diskretizacija. Potrebno je identifikovati ulazne i izlazne signale sistema i opsege njihovih

vrednosti. Opseg senzorskih merenja obično odgovara domenu ulazne promenljive, a opseg upravljačkih akcija daje domen izlazne promenljive.

- 3) funkcije pripadnosti rasplnutih skupova;
- 4) pravila izvođenja;
- 5) implikaciju, metod izoštravanja.

Projektovanje rasplinuto-logičkih regulatora podrazumeva znatno više projektantskih izbora, nego što je to slučaj kod linearnih regulatora. U daljem izlaganju biće razmotreni neki od ovih elemenata projektovanja, i na osnovu sopstvenih iskustava.

Potpunost.

Onaj skup elemenata nekog domena razmatranja S na kome je definisan neki rasplinuti skup F , koji sadrži samo one elemente čiji je stepen pripadnosti skupu F veći od 0, $\{x | \mu_F(x) > 0\}$, naziva se nosač rasplnutog skupa F . Strategija baze znanja bavi se nosačima na kojima se definišu primarni rasplinuti skupovi. Primarni rasplinuti skupovi su oni rasplinuti skupovi koji se pridružuju jezičkim promenljivim u rasplnutim pravilima, na primer sl.10. Izbor primarnih rasplnutih skupova treba da je takav da algoritam rasplnutog upravljanja uvek daje odgovarajuću upravljačku akciju za svako stanje procesa. Da bi to bilo tako, unija nosača primarnih rasplnutih skupova treba da pokriva domen razmatranja koji se posmatra u odnosu na neki skup ε -nivoa. Skup ε -nivoa (često se koristi termin α -nivo ili α -pre-sek) je skup elemenata domena razmatranja za koji funkcija pripadnosti posmatranog rasplnutog skupa ima vrednost ne manju od ε . Ovo svojstvo RLR se naziva ε -potpunost. Potpunost RLR odnosi se na njegovu bazu znanja, a praktično znači da se grafici funkcija pripadnosti primarnih rasplnutih skupova preklapaju na visini ε , pod uslovom da se ulazne promenljive kombinuju korišćenjem logičkog I. Svojstvo potpunosti se ugrađuje u bazu znanja na osnovu inženjerskog iskustva.

Diskretizacija domena razmatranja.

Diskretizacijom (kvantizacijom) domena razmatranja diskretizuje se domen u izvestan broj segmenata (kvantizacionih nivoa).

U slučaju RLR sa kontinualnim domenom, broj kvantizacionih nivoa treba da je dovoljno veliki da obezbedi adekvatnu aproksimaciju, a ipak mali zbog uštede memorijskog prostora. Izbor nivoa kvantizacije od suštinske je važnosti za finoću upravljanja koja se može dobiti.

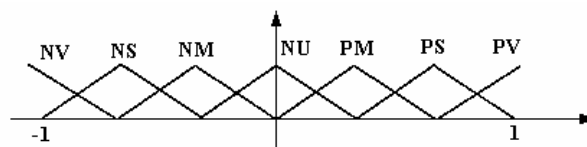
Indirektnom obradom može se ostvariti tabela poređenja zasnovana na diskretnom domenu koja definiše izlaz regulatora za sve moguće kombinacije ulaznih signala. Tako se dobije "na tabeli zasnovani" rasplinuto-logički regulator, koji je u eksperimentima pokazao brže izvršavanje u odnosu na klasičan RLR. Za sad ne postoje sredstva formalne analize kojima bi se moglo proučavati kako kvantizacija utiče na performanse rasplinuto-logičkog regulatora. Kvantizacija može biti izvor nestabilnosti i problema sa oscilacijama.

Rasplinuta podela ulaznih i izlaznih prostora.

Jezička promenljiva u AKO delu rasplnutog pravila upravljanja obrazuje rasplinuti ulazni prostor u odnosu na izvestan domen razmatranja, dok promenljiva u ONDA delu pravila obrazuje rasplinuti izlazni prostor. U opštem

slučaju, jezičkoj promenljivoj se pridružuje skup termina, pri čemu je svaki termin u skupu termina definisan na istom domenu razmatranja. Rasplinuta podela*, onda, određuje koliko termina treba da postoji u skupu termina. Primarni rasplinuti skupovi obično imaju značenje, kao NV (negativno veliko), NS (negativno srednje), NM (negativno malo), NU (blisko nuli), PM (pozitivno malo), PS (pozitivno srednje), PV (pozitivno veliko).

Gruba rasplinuta podela ulaznog prostora mogla bi biti ona na sl.2. U slučaju rasplnutog sistema dva-ulaza-jedan-izlaz, ako rasplnute promenljive x i y mogu uzeti 7 raznih vrednosti, respektivno, sl.10, maksimalni broj pravila je 7×7 (za svaku od 7 vrednosti x , y može uzeti 7 vrednosti). Rasplinuta podela rasplnutog ulazno/izlaznog prostora nije deterministička i nema jedinstveno rešenje. Za pronalaženje optimalne rasplnute raspodele koristi se heuristički postupak.



Slika 10. Preciznija rasplinuta podela domena [-1, 1]

Izbor funkcija pripadnosti primarnih rasplnutih skupova.

Dva su metoda koji se koriste za definisanje rasplnutih skupova, zavisno od toga da li je domen razmatranja kontinualan ili diskretan: *funkcionalni metod* i *numerički metod*.

1. **Funkcionalan metod:** Funkcionalna definicija izražava funkciju članstva rasplnutog skupa u funkcionalnom obliku, obično u obliku funkcije zvonastog oblika, funkcije trougaonog oblika, funkcije trapezastog oblika itd. Izbor oblika funkcije pripadnosti od uticaja je na ukupne performanse regulatora [17], a ne samo na robusnost [9]. Od značaja je da se u RLR koriste funkcije pripadnosti koje omogućavaju korišćenje rasplnute aritmetike. Za dodeljivanje stepeni pripadnosti mogu se koristiti bilo numerička definicija bilo funkcionalna definicija. Na sl.11 prikazana je jedna nelinearna funkcija pripadnosti.



Slika 11. Funkcija pripadnosti zvonastog oblika

2. **Numerički metod.** U ovom slučaju, funkcija pripadnosti rasplnutog skupa predstavljena je kao vektor brojeva, čija dimenzija zavisi od stepena diskretizacije.

Baza znanja.

Rasplinuti sistem je okarakterisan skupom jezičkih tvrdnji formiranih na osnovu ekspertskog znanja. Ekspertsko znanje je obično oblika " AKO – ONDA "

*engl. fuzzy partition

pravila, koja se lako implementiraju rasplinutim uslovnim tvrdnjama u rasplinutoj logici. Kolekcija rasplinutih pravila upravljanja koja se izražavaju kao rasplinute uslovne tvrdnje obrazuju bazu znanja ili skup pravila RLR-a.

Izbor (ulaznih) promenljivih stanja procesa i (izlaznih) promenljivih upravljanja rasplinutih pravila upravljanja.

Rasplinuta pravila upravljanja su pogodnije formulisana preko jezičkih nego preko numeričkih termina. Uobičajeno je da su jezičke promenljive u RLR-u stanje, greška stanja, izvod greške stanja, integral greške stanja itd. Problem međusobnog uticaja više pravila, što se može ogledati i u uticaju na upravljačku akciju, je složen i predmet je istraživanja.

Način dobijanja rasplinutih pravila upravljanja.

Četiri su načina dobijanja rasplinutih pravila upravljanja.

1) *Ekspertsko iskustvo i znanje tehnika upravljanja sistemima*

Rasplinuta pravila upravljanja nude prirodan okvir za opisivanje čovekovog ponašanja i analize odlučivanja, kao i pogodan način za izražavanje stručnog znanja iz određene oblasti stručnosti.

2) *Upravljačke akcije operatora*

U mnogim industrijskim upravljačkim sistemima tipa čovek-mašina, ulazno-izlazne relacije nisu poznate sa dovoljnom preciznošću da bi bilo moguće koristiti klasičnu teoriju modelovanja i simulacije. Ipak, vešti operatori mogu upravljati takvim sistemima veoma uspešno, nemajući na umu bilo kakve kvantitativne modele, već koristeći skup rasplinutih AKO – ONDA pravila za upravljanje procesom. Da bi se takvi procesi automatizovali, korisno je izraziti upravljačka pravila operatora kao rasplinuta AKO – ONDA pravila koja koriste jezičke promenljive. U praksi, takva pravila se mogu izvoditi na osnovu posmatranja čovekovih upravljačkih akcija izraženih preko ulazno-izlaznih radnih podataka.

3) *Rasplinuti model procesa*

U jezičkom prilazu, jezički opis dinamičkih karakteristika upravljanog procesa može se posmatrati kao rasplinuti model procesa. Na osnovu rasplinutog modela, može se generisati skup rasplinutih upravljačkih pravila za postizanje optimalnih performansi dinamičkog sistema.

4) *Obučavanje*

Procyk i Mamdani, [16], su opisali prvi samoorganizujući regulator, kao proširenje rezultata u [12]. Ovaj rasplinuto-logički regulator poseduje svojstvo adaptivnosti, obučavanja, poboljšava svoje performanse. Samoorganizujući regulator ima hijerarhijsku strukturu, koju čine dve baze znanja: jedna od njih predstavlja željeni ukupan odziv sistema izražen tzv. tabelom performansi, a druga čini "na tabeli zasnovani regulator". Radom Procyka i Mamdanija [16] otvorena je jedna aktuelna oblast istraživanja.

Realizacija rasplinuto-logičkog regulatora i eksperimentalni podaci

U ovom delu opisana je softverska simulacija rasplinuto-logičkog PD regulatora, i njegovo upoređenje sa konven-

cionalnim linearnim PD regulatorom. PD regulator se može upotrebiti kada samo proporcionalno upravljanje nije odgovarajuće, na primer, kada treba smanjiti preskok i poboljšati vreme smirenja procesa.

U opštem slučaju, rasplinuti PD regulator je opisan izrazom dobijenim iz izraza (8):

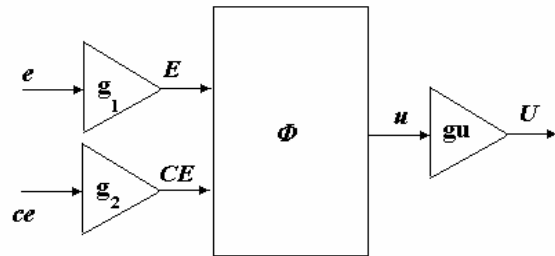
$$u_{PD}(kT) = \Phi(g_1 \cdot e(kT), g_2 \cdot ce(kT)) \cdot gu \quad (17)$$

gde su: ulazi u PD regulator, greška $e(kT) = y_r(kT) - y(kT)$, i promena greške

$$ce(kT) = \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (18)$$

y_r referentna vrednost, $y(kT)$ je izlaz sistema u trenutku $t = kT$, a g_1 , g_2 i gu su pojačanja. U izrazu (17) Φ je baza znanja, koja može predstavljati i nelinearan proces.

Struktura rasplinutog PD regulatora je data na sl.12. Blok označen sa Φ na sl.12 je baza znanja.



Slika 12. Rasplinuti PD regulator

Kada je proces linearan ili u delovima linearan i kada se proces može stabilizovati, što odgovara uslovima realizacije konvencionalnog regulatora, baza znanja Φ može se zameniti matematičkim modelom PD regulatora. Linearna aproksimacija rasplinuto-logičkog PD regulatora je tada:

$$u_{PD}(kT) = (g_1 \cdot e(kT) + g_2 \cdot ce(kT)) \cdot gu \quad (19)$$

Linearni PD regulator (5) može se posmatrati kao linearizovani rasplinuto-logički regulator (19), pri čemu: $g_1 \cdot gu$ odgovara parametru K_P , i $g_2 \cdot gu$ odgovara parametru K_D , ($K_I=0$), te se rasplinuto-logički PD regulator (17) i linearni PD regulator (19) mogu uporediti.

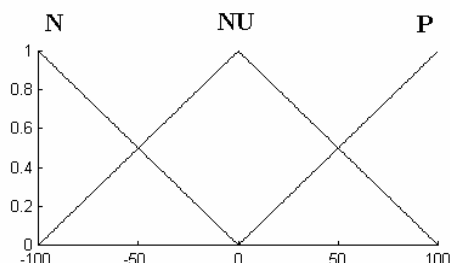
Za rasplinuti PD regulator sa sl.12, čija su pojačanja $g_1 = 230$, $g_2 = 45$, $gu = 0.5$, dobijena u procesu podešavanja regulatora u sistemu pozicioniranja, sledeća baza znanja opisuje proces:

- R_1 : AKO e je N I ce je N ONDA u je JNI
- R_2 : AKO e je N I ce je NU ONDA u je BNI,
- R_3 : AKO e je N I ce je P ONDA u je NUI,
- R_4 : AKO e je NU I ce je N ONDA u je BNI,
- R_5 : AKO e je NU I ce je NU ONDA u je NUI, (20)
- R_6 : AKO e je NU I ce je P ONDA u je BPI,
- R_7 : AKO e je P I ce je N ONDA u je NUI,
- R_8 : AKO e je P I ce je Z ONDA u je BPI,
- R_9 : AKO e je P I ce je P ONDA u je JPI.

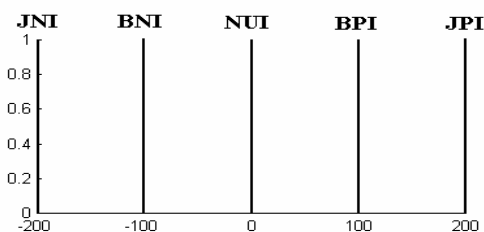
U bazi znanja (20) oznake N, NU i P su oznake ulaznih rasplinutih skupova trouglastih funkcija pripadnosti, (N za "negativno", NU za "blisko nuli", P za "pozitivno"), sl.13. Ulazni domen je predstavljen u standardnoj varijanti, u

obliku procenata pune veličine, intervalom $[-100,100]$.

Rasplinuto-logički PD regulator je realizovan sa singletonima na izlazu, u ONDA delu pravila, što pojednostavljuje zaključivanje. Oznake JNI (jaki negativan izlaz), BNI (blagi negativan izlaz), NUI (izlaz nula), BPI (blagi pozitivan izlaz) i JPI (jaki pozitivan izlaz) su oznake izlaznih skupova, singletona, kao na sl.14 Izlazni domen je $[-200,200]$, zbir dva ulazna domena. Primenjeni metod izoštavanja je metod izoštavanja visina, (15).

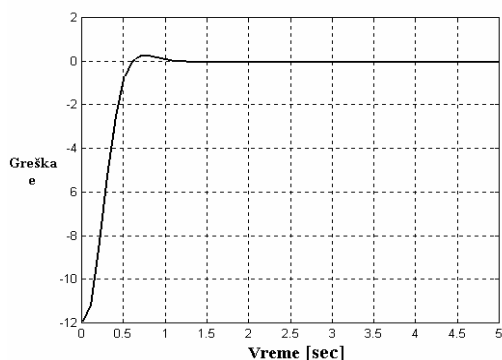


Slika 13. Funkcije pripadnosti ulaznih rasplnutih skupova



Slika 14. Izlazni rasplnuti skupovi u obliku singletona

Signal greške e za sistem sa ovako realizovanim rasplinuto-logičkim PD regulatorom dat je na sl.15.



Slika 15. Greška izlaza u odnosu na referentnu vrednost za razmatrane PD regulatore

Realizovan je linearni PD regulator (19), u istom sistemu, za iste vrednosti pojačanja i iste izlaze. Dobijen je potpuno isti signal greške e , prikazan na sl.15.

Iz ovog eksperimenta se mogu zaključiti dve važne činjenice:

- 1) rasplinuto-logički regulator može imati bar tako dobre performanse kao linearni regulator, jer se linearni regulator može obrazovati kao specijalan slučaj rasplinuto-logičkog regulatora;

- 2) razlika između klasičnog i rasplnutog metoda upravljanja je u načinu ustanovljavanja upravljačkog zakona. Kod klasičnih sistema upravljanja upravljački zakon se izračunava korišćenjem matematičkog modela procesa. U rasplinuto-logičkom pristupu, saglasnom sa pristupom u veštačkoj inteligenciji, upravljački zakon se formira na osnovu predstavljene stručnosti. Regulatori P(I)D ostvaruju samo linearni zakon upravljanja, rasplinuto-logički regulator može ostvariti i nelinearne zakone. U procesu podešavanja regulatora rasplnuti PD regulator ima jedan stepen slobode više, jedno pojačanje više.

U opštem slučaju, kod rasplnutog regulatora postoji više parametara podešavanja nego kod odgovarajućeg linearnog, pa je teško napraviti korektno poređenje rasplinuto-logičkog i linearnog regulatora.

Drugi eksperimenti, koji ovde nisu dokumentovani ukazuju da rasplnuti PD regulator može imati duže vreme uspona nego njegov konvencionalni parnjak, ali manji preskok. Upravljački signal rasplnutog PD regulatora je glatkiji.

Primene

U ovom delu se na osnovu dostupnih podataka daje pregled realizovanih primena rasplinuto-logičkih regulatora, što daje sliku njihove upotrebljivosti i u oblastima koje nisu navedene.

U poslednjih nekoliko godina, naročito u Japanu, SAD i Nemačkoj, uspešno je razvijen veliki broj komercijalnih i industrijskih rasplnutih sistema. Prvu primenu rasplnute logike realizovao je Mamdani sa sar. koji je 1974. god. projektovao eksperimentalno rasplinuto upravljanje parnom mašinom. Godine 1980. danska kompanija (*F.L.Smith&Co. A/S*) upotrebila je rasplinutu teoriju u upravljanju sušarom cementa. Tri godine kasnije, u *Fuji Electric Co., Ltd.* (Japan) implementirano je rasplinuto upravljanje ubrizgavanjem hemikalija u postrojenja za pročišćavanje vode.

Prvi rasplnuti regulator bio je izložen na Drugom IFSA kongresu 1987.god. Ovaj regulator je potekao iz korporacije *Omron*, japanske kompanije koja je započela istraživanja u rasplnutoj logici 1984. god. i od tada je prijavila preko 700 patenata. Takođe 1987.god. u gradu Sendai, Japan, počeo je rad *Regulator automatskih operacija voza podzemne železnice Sendai*, koji je projektovao tim firme *Hitachi*. Godine 1989. na Poslovnoj izložbi u Harumi, Japan, firma *Omron Corp.* je demonstrirala rasplinutu radnu stanicu. Takva radna stanica je računar zasnovan na RISC procesoru, opremljen pločom za rasplinuto zaključivanje. Ova ploča za rasplinuto zaključivanje koristi se za uskladištavanje i pretraživanje rasplnutih informacija i za rasplinuto zaključivanje.

Primena rasplnute teorije u potrošačkim proizvodima počela je 1990.god. u Japanu. Primer toga je "rasplnuta mašina za pranje veša". Drugi primer je rasplnuta logika koja se nalazi u regulatorima elektronskog ubrizgavanja goriva i u sistemima upravljanja automatskom navigacijom u automobilima, i koja složena upravljanja čini efikasnijim i lakšim za upotrebu. Rasplnuta logika se takođe upotrebljava u usisivačima za prašinu, kamkorderima,

televizijskim aparatima, itd. Godine 1993., *Sony* je predstavio računar *Sony PalmTop*, koji koristi algoritam stabla odlučivanja zasnovan na rasplinutoj logici za raspoznavanje rukopisnih (napisanih korišćenjem računarske svetlosne olovke) Kanji znakova.

U tabeli 1 date su neke komercijalne primene rasplinuto-logičkih regulatora.

Tabela 1. Industrijske primene rasplinuto-logičkih regulatora

Proizvod	Kompanija
Upravljanje temperaturom	NASA u spejs šatlu
Upravljanje prenosom kod vozila	GM (Saturn), Honda, Mazda
Upravljanje klima uređajima	Ford
Mašina za pranje veša	AEG, Sharp, Goldstar
Lonac za kuvanje pirinča	Goldstar
Posuda za kuvanje/prženje	Tefal
Mikrotalasna pećnica	Sharp
Električni brijač	Sharp
Frižider	Whirlpool
Punjač baterija	Bosch
Usisivač za prašinu	Philips, Siemens
Kamkorderi	Canon, Sanyo, JVC
Kreditne kartice	GE Corporation

Oblast primene u kojoj je ostvaren najveći uspeh je rasplinuto upravljanje raznim fizičkim ili hemijskim karakteristikama, kao što su temperatura, električna struja, protok tečnosti/gasa, kretanje mašina, i sl. Takođe, mogu se dobiti rasplinuti sistemi primenjivanjem principa rasplinitih skupova i logike na druge oblasti, na primer, rasplinuti sistemi zasnovani na znanju kao što je rasplinuti ekspertski sistem koji može koristiti AKO-ONDA pravila; "rasplinuto softversko inženjerstvo" koje može otelotvoriti rasplinitost u programima i podacima; rasplinite baze podataka koje skladište i pretražuju rasplinite informacije; rasplinuto raspoznavanje oblika koje se bavi rasplinitim video i audio signalima; interesantne su primene u medicini, ekonomiji, i problemima upravljanja koji obuhvataju obradu rasplinitih informacija, kao i u vojnim sistemima [18].

Kada se rasplinuti sistemi primenjuju na odgovarajuće probleme, naročito na probleme upravljanja, njihove tipične karakteristike su brži i glatkiji odziv nego kod konvencionalnih sistema. To znači da se u zadacima kao što su upravljanje temperaturom, brzinom kretanja, na primer, može dobiti efikasnije i udobnije upravljanje, a time se štede energija, smanjuju troškovi održavanja, i produžava vek trajanja mašina. Opisivanje pravila upravljanja u rasplinitim sistemima je obično jednostavnije i lakše, često zahteva manje pravila, i onda sistemi rade brže nego konvencionalni sistemi. Rasplinuti sistemi često postižu željeno ponašanje, robusnost i niske ukupne troškove. Sve ovo doprinosi boljim performansama sistema. Ukratko, konvencionalni metodi su dobri za jednostavne probleme, dok su rasplinuti sistemi pogodni za kompleksne probleme ili primene koje obuhvataju ljudsko intuitivno ili opisno mišljenje.

Postoje otvoreni problemi i ograničenja rasplinitih sistema među kojima su:

Stabilnost: nema teorijske garancije da će opšti rasplinuti sistem izbeći haotično ponašanje i da će ostati stabilan, iako su mogućnosti da do takvog ponašanja dođe veoma male, što je zaključeno iz veoma velikog iskustva.

Određivanje ili podešavanje dobrih funkcija pripadnosti i rasplinitih pravila nije uvek lako. Čak i posle velikih

testiranja, teško je reći koliko je stvarno potrebno funkcija pripadnosti. Pitanja kao što su: zašto je za određeni rasplinuti ekspertski sistem potreban određeni broj pravila, ili kada se može prestati sa dodavanjem pravila u ekspertski sistem, nemaju odgovore do kojih se dolazi lako.

Verifikacija i vrednovanje rasplinitih ekspertskih sistema, u opštem slučaju, zahtevaju opsežno testiranje.

Interesantan istraživački problem je problem inverznog klatna. Sreće se kao test-problem rasplinuto-logičkih, ali i drugih regulatora. Problem je relativno složen. Predstavlja primer fizičkog sistema u nestabilnoj ravnoteži, što je analogno upravljanju korišćenjem autopilota kod brodova, aviona ili raketa, ili upravljanju hemijskim reakcijama u situacijama kada sama smesa razvija toplotu blizu željene temperature.

Zaključak

Rasplinuto-logički regulatori su regulatori čiji rad se zasniva na skupu rasplinitih AKO-ONDA upravljačkih pravila iz kojih se zaključak dobija na osnovu rasplinite implikacije i kompozicionog pravila zaključivanja. Funkcionisanje rasplinuto-logičkih regulatora zasniva se na algoritmu kojim se jezički izražena strategija upravljanja zasnovana na stručnom znanju transformiše u strategiju automatskog upravljanja. Ovi regulatori su komplementarni sa konvencionalnim regulatorima.

Rasplinuto-logički regulatori koriste se kada su procesi kompleksni za analizu konvencionalnim kvantitativnim metodama, ili kada su raspoloživi izvori informacija interpretirani kvalitativno, netačno ili nezvesno.

Nedostaci rasplinuto-logičkih regulatora su:

- nema sistematskog postupka projektovanja rasplinuto-logičkih regulatora;
- mogu biti sporiji u izvršavanju, zbog načina obrade;
- traže dodatnu računarsku podršku;
- formiranje baze znanja zahteva vreme;
- pogodni su za korišćenje samo kada relativno velike periode odabiranja nisu problem, za spore sisteme.

Osnovni koraci u razvoju rasplinitog sistema su sledeći:

Odrediti da li je rasplinuti sistem pravi izbor za problem.

Ako je znanje o ponašanju sistema opisano u približnom obliku ili heurističkim pravilima, onda je primena rasplinitog modela prikladna. Pored toga, rasplinita logika može poslužiti i za uprošćavanje obrade, kada opis ponašanja sistema zahteva komplikovane matematičke modele.

Definisati primarne funkcije pripadnosti za svaki ulazni i izlazni parametar. Zahtevani broj funkcija pripadnosti je stvar izbora onog ko razvija sistem i zavisi od ponašanja sistema.

Konstruisati bazu znanja. Od projektanta zavisi koliko je pravila potrebno. Verifikovati performanse baze znanja.

Literatura

- [1] ŠALETIĆ, D. *O ekspertskim sistemima i njihovim vojnim primenama*. kumulativna naučno-tehnička informacija, Vojnotehnički institut KoV, Beograd, 1986.
- [2] DURKIN, J. *Expert Systems, Design and Development*. MacMillan Publishing Co., New York, 1994., ISBN 0-02-330970-9.
- [3] ZADEH, L. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol.8, p.338—353.
- [4] KAUFMANN, A. *Introduction a la Théorie des sous-ensembles*

- flous*. Tome I, Masson, Paris, 1973.
- [5] PAP,E. *Fazi (rasplinuti) skupovi i sistemi*. SYMOPIS '92, XIX simpozijum o operacionim istraživanjima, zbornik radova, Beograd, 13.--16. oktobar 1992., p.3-8.
- [6] ZADEH,L. The Concept of Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Part 1,2, and 3, *Information Sciences*, vol.8, p.199-249; 301-357; vol.9, p.43-80.
- [7] ZADEH,L. Theory of approximate reasoning. u J.E.Hayes, D. Michie, L. Mikulich, ed., *Machine Intelligence*, vol.9., Wiley, New York, 1979., p.149-194.
- [8] ZADEH,L. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3, Jan.1973., p.28-44.
- [9] LEE,C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. March-April 1990., vol. SMC-20, no.2, p.404-418.
- [10] LEE,C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. March-April, 1990., vol.SMC-20, no.2, p.419-435.
- [11] STOJIC,M. *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*. Građevinska knjiga, Beograd, 1978.
- [12] MAMDANI, E., ASSILIAN,S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol.VII, p.1-13.
- [13] SUBAŠIĆ,P. *Fuzzy logika i neuronske mreže*. Tehnička knjiga, Beograd, 1997., ISBN 86-325- 0471-1.
- [14] TSUKAMOTO,Y. An approach to fuzzy reasoning method. u *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, M.M.Gupta,R.K.Ragade,R.R.Yager, ur., Amsterdam, North-Holland,1979.
- [15] TAKAGI,T. SUGENO,M. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Jan.-Feb.1985, vol.15, no.1, p.116-132.
- [16] PROCYK,T.J., MAMDANI,E. A Linguistic Self-Organizing Process Controller. *Automatica*, 1979., vol.XV, p.15-30.
- [17] ŠALETIĆ,D.Z., VELAŠEVIĆ,D.M., MASTORAKIS,N.E. *The Influence of Shapes of Fuzzy Sets Membership Functions on Fuzzy System Performances*. Proc. of the 3rd World Multiconference on: Circuits, Systems, Communications and Computers (IEEE-/WSES/IMACS), Athens, Greece, 4th-8th July 1999., p.1131-1135
- [18] ŠALETIĆ,D., VELAŠEVIĆ,D. *Selekcija vojnih sistema na osnovu teorije rasplinitih skupova*. SYMOPIS '98, XXV jugoslovenski simpozijum o operacionim istraživanjima, zbornik radova, Herceg Novi, 21. – 24. septembra 1998., p.1053-1056.

Rad primljen: 5.1.2000.god.