

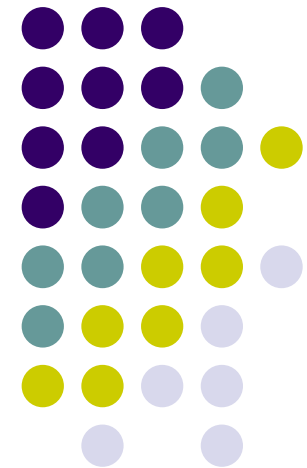
# Lekcija 12: *Neizraziti sistemi upravljanja*

---

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić  
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mehatronika

2012/2013



## 12. Neizraziti sistemi

- **Neizraziti regulatori**, ili općenito neizraziti sistemi, pripadaju skupini *sistema temeljenih na znanju* (engl. knowledge based systems).
- Sistemi temeljeni na znanju, koji se koriste za upravljanje zatvorenim sistemima, postižu zahtijevane performanse, pouzdanost i robusnost **ukorporiranjem znanja koje se ne može izraziti analitičkim putem**.
- Kod zatvorenih sistema automatskog upravljanja, sistemi temeljeni na znanju se mogu koristiti za ***nadzor obavljanja upravljačkih operacija*** ili za ***direktno izvršavanje upravljačkih komandi***, zamjenjujući konvencionalni upravljački algoritam.



# Neizraziti sistemi

- Neizraziti sistemi upravljanja se mogu razmatrati na dva načina.
- **Prvi kaže** da su to *ekspertni sistemi za rad u stvarnom vremenu* koji implementiraju ekspertizu ljudskih operatora ili procesnih inženjera, koja se ne može jednostavno izraziti u formi parametara PID regulatora ili diferencijalnih jednažbi (ili jednažbi diferencija za diskretne sisteme), već se za to koriste *pravila tipa situacija/akcija*.
- Kod neizrazitog sistema upravljanja postoje dvije jasno odvojene razine, što ih razlikuje od klasičnih ekspertnih sistema.



# Neizraziti sistemi

- Te razine su *simbolička AKO-ONDA pravila i kvalitativne neizrazite varijable* čije su vrijednosti opisane riječima prirodnog jezika, npr. "AKO prozor je zatvoren / ventilator je isključen ONDA uključi ventilator".
- Prema tome, neizraziti regulatori mogu koristiti **simboličke ulazne vrijednosti**, za razliku od mnogih drugih sistema koji isključivo rade sa numeričkim vrijednostima.
- Neizrazite vrijednosti kao što je "isključen" i neizraziti operatori, kao što je "I" se prevode u elementarne numeričke objekte i algoritme, kao što su tabele, interpolatori, komparatori, itd.
- Postojanje ove razine prevođenja je osnova za brzu implementaciju u stvarnom vremenu, jednako kao i **ugradivost** neizrazitog upravljanja u numeričke okoline konvencionalnog upravljanja.



# Neizraziti sistemi

- **S druge strane**, neizrazito upravljanje se može promatrati kao heuristički i modularni način definiranja *nelinearnih, na tabelama temeljenih, sistema upravljanja*.
- Kod ovih sistema se koristi skupina pravila koja rezultira u definiciji nelinearne prijenosne funkcije, bez potrebe za pojedinačnim definiranjem pojedinog elementa tabele, kao i bez potrebe poznavanja zatvorene forme prijenosne funkcije.
- Neizrazito upravljanje se može kombinirati sa linearnim PID upravljanjem na način da se linearni PID regulator koristi za upravljanje oko referentne, vodeće, vrijednosti, a da se "delinearizacija" ostalih područja obavi pomoću upravljačke strategije korištenjem neizrazitih pravila.



# Neizraziti sistemi

- Uzimajući u obzir ova dva načina definiranja neizrazitih sistema upravljanja, postavlja se pitanje da li neizrazite sisteme promatrati kao **ekspertne sistema za rad u stvarnom vremenu** ili **kao nelinearne sisteme upravljanja**?
- Korištenjem teorema prikaza, dokazano je da se *bilo koja nelinearna funkcija može aproksimirati sa željenom tačnošću korištenjem konačnog skupa neizrazitih varijabli, vrijednosti i pravila.*
- Ovaj teorem demonstrira moć neizrazitog upravljanja, ali još ne daje odgovor na pitanje **koliko pravila je potrebno da se to ostvari?**
- Ovo predstavlja još uvijek otvoreno pitanje u neizrazitim sistemima.



# Neizraziti sistemi

- Posebno je važno razmatrati neizrazite regulatore iz industrijske perspektive.
- Poznato je da su neizraziti regulatori ugrađeni u mnogim kućanskim aparatima, automobilima, hemijskim procesima, itd, te da se njihova primjena u industriji dramatično počela povećavati od 1990. godine.
- Ovakav razvoj je uvjetovala činjenica da su oni sposobni riješiti složene inženjerske probleme uz veoma male napore.
- S druge strane, mnogi znanstvenici su propagirali ideju da : "Sve što se može uraditi pomoću neizrazitog upravljanja, može se jednako dobro uraditi i sa konvencionalnim upravljanjem".
- Postavlja se pitanje: "Zašto se neizrazito upravljanje koristi u situacijama kada konvencionalno upravljanje daje dobre rezultate i koristi se pouzdano već dugo godina".



# Neizraziti sistemi

- Najvažnija područja eksperimentalne primjene neizrazitih sistema u polju upravljanja procesima mogu se kategorizirati u četiri kategorije:
  - **Nadzor procesa** (engl. process monitoring).
  - **Dijagnoza kvarova** (engl. fault diagnosis).
  - **Planiranje i predviđanje** (engl. planning and scheduling).
  - **Nadzorno upravljanje** (engl. supervisory control).
- **Neizraziti sistem nadzora** operira sa podacima u stvarnom vremenu, kontinuirano ih obrađuje i podržava operatora procesa u izboru ispravnih informacija koje daju dobar uvid u proces sa stajališta vremenske perspektive, npr. raniji, trenutni i budući izlazi procesa i njihove kombinacije.





## Neizraziti sistemi

- Što se tiče **dijagnoze kvarova** (pogreški), ona se odnosi na bavljenje kvarovima koji ne uzrokuju pojavu alarma.
- Koristi se kao alat za on-line podršku otkrivanju kvarova.
- Ono što je važno kod detekcije kvarova, ili pogreški, jest **posjedovanje znanja koje će prepoznati i nepredvidive kvarove**.
- Tokom dijagnoze kvarova, mjereni procesni podaci se uspoređuju sa podacima iz modela procesa i odstupanja se interpretiraju kao **indikator kvara**.
- Prednost sistema detektiranja kvara temeljenih na sistemima učenja je da su **oni generički i da mogu detektirati sve vrste, do sada poznatih, kvarova**.



# Neizraziti sistemi

- **Zadatak planiranja** u sistemu upravljanja procesima ima predominantno menadžmentsku funkciju koja osigurava da se zahtijevane varijable uklapaju unutar raspoloživih proizvodnih resursa.
- On zahtijeva prikaz znanja o tehničkim i ekonomskim ograničenjima i teško ga je analitički modelirati.
- Postoje dva glavna aspekta planiranja u procesnom upravljanju.
- **Dugoročno planiranje** uključuje proširenje i rekonfiguraciju sistema upravljanja procesom.
- **Kratkoročno planiranje** uključuje planiranje zadataka koje treba obaviti u kratkoročnom vremenskom intervalu, kako bi se osiguralo dobro funkcioniranje sistema.



# Neizraziti sistemi

- Obje vrste planiranja se temelje na sekvencama akcija i odgovarajućem, predviđenom, vremenu za izvršavanje istih.
- Načešće se za proces planiranja koriste tehnike linearnog i dinamičkog programiranja.
- Međutim, modeliranje pretpostavki na kojim se osnivaju ove tehnike često se ne podudaraju sa stvarnim situacijama.
- S druge strane, **heuristike i kvalitativne preference se ne mogu jednostavno uključiti u analitičke modele.**
- **Neizraziti sistem planiranja i predviđanja akcija u procesnom upravljanju omogućuju nadogradnju i poboljšanje do sada korištenih tehnika.**



# Neizraziti sistemi

- **Nadzorno upravljanje** jako ovisi o iskustvu operatora procesa, koje varira od operatora do operatora (različite razine znanja i iskustva).
- U neizrazitom sistemu nadzornog upravljanja primarna upravljačka funkcija jest proširiti područje primjene konvencionalnog upravljanja dodavanjem operacija nadzornog učenja.
- Primjeri uključuju **autopodešavanje sistema s ciljem formiranja procesnog znanja** [Arzen, 1986] i **neizrazito adaptivno podešavanje parametara regulatora** [Bristol, 1977; Velagić i saradnici, 2003].



## 12.1. Neizrazita logika

- Povećanjem složenosti sistema smanjuje se sposobnost ljudi da načine precizne i izvjesne iskaze o njegovom ponašanju.
- Ljudsko znanje o realnom svijetu je uobličeno riječima, puno je nejasnih, nepreciznih izraza, subjektivno je i kontekstno zavisno.
- Složenost se uglavnom javlja zbog neizvjesnosti proistekle iz nepreciznosti.
- Zadeh je pokazao korelaciju između složenosti sistema i njegove nepreciznosti kroz ***princip nekompatibilnosti***: “Ako vaš pogled usmjerite na rješavanje stvarnog problema, neizrazitost postaje njegovo rješenje” [Zadeh, 1973].
- Stjecanjem većeg znanja o sistemu povećava se njegovo razumijevanje, odnosno preciznost opisa.



# Neizrazita logika

- Neizrazitost predstavlja novi pogled na oblikovanje stvarnosti.
- Analizu i sintezu sistema sa većom složenosti teško je, a ponekad i nemoguće, provesti klasičnim postupcima temeljenim na matematičkim jednažbama (diferencijalne ili diferentne).
- Za većinu složenih sistema, gdje postoji mali broj dostupnih podataka i gdje su jedino dostupne neprecizne informacije, neizrazito rasuđivanje daje put za razumijevanje ponašanja sistema omogućujući aproksimativnu interpolaciju između procijenjenih ulaznih i izlaznih situacija.
- Koncept neizrazitih skupova prvi je definirao Zadeh 1965 godine, naglašavajući da oni predstavljaju *lingvističke strukture koje se koriste kao računarski elementi u neizrazitom zaključivanju i obradi neizrazitih informacija.*



# Neizrazita logika

- **Klasična logika:**

- Svaki element i svaki skup pripadaju istom prostoru, element pripada skupu ili mu ne pripada, odnosno pripada njegovom komplementu.
- Druga pretpostavka je da element ne može istovremeno pripadati nekom skupu i njegovom komplementu.

- **Neizrazita logika:**

- Koristi tzv. **meću pripadnost skupu**, tj. element može pripadati skupu sa određenim stupnjem, koji se kreće od 0 do 1, gdje stupanj 1 označava punu pripadnost skupu.
- Bilo koji element **može istovremeno pripadati većem broju skupova** sa istim ili različitim stupnjevima pripadnosti. Razlog tome je činjenica da pripadnost elemenata neizrazitom skupu **ne mora biti kompletna**.
- Prema tome, klasični, odnosno izraziti skupovi, su ustvari podskupovi neizrazitih skupova.



# Neizrazita logika

- Neizraziti skupovi se definiraju pomoću funkcija pripadnosti:

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1]$$

koja se interpretira kao stupanj pripadnosti elementa  $x$  neizrazitom skupu  $\tilde{A}$  za svaki  $x \in X$ .

- Navedeni izraz se može napisati i kao:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$$

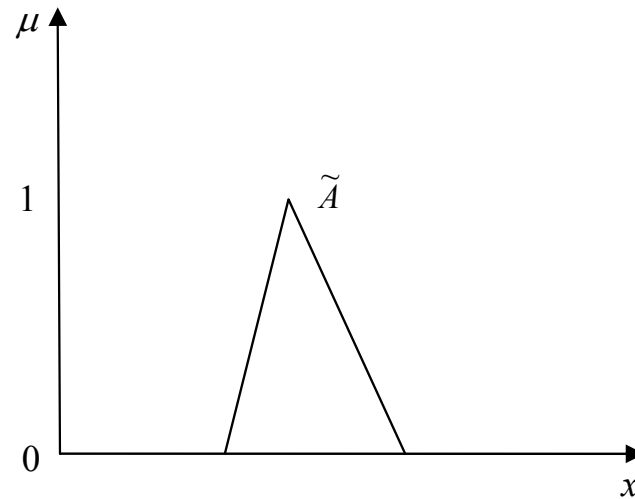
- Drugim riječima,  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  je vrijednost na jediničnom intervalu koja mjeri stupanj kojim element  $x$  pripada neizrazitom skupu  $\tilde{A}$ .





# Neizrazita logika

- Funkcija pripadnosti se predstavlja krivuljom koja prikazuje način na koji se pojedinoj tački ulaznog prostora dodjeljuje stupanj pripadnosti neizrazitom skupu, a koji može biti između 0 i 1.



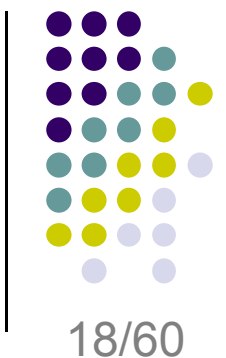
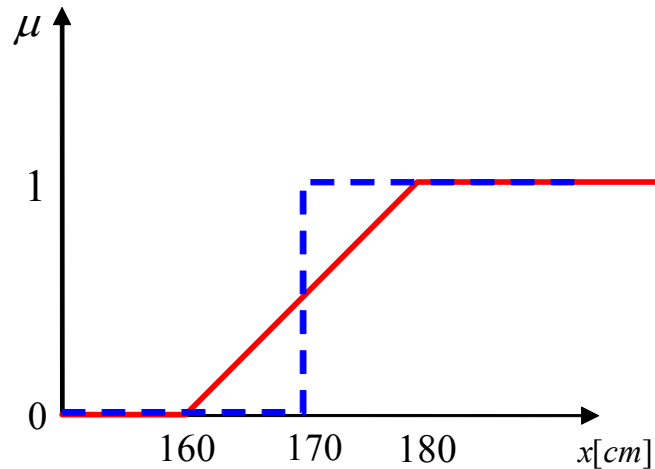
- Neizraziti skup  $\tilde{A}$  je u potpunosti određen sljedećim uređenim parovima:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\}$$

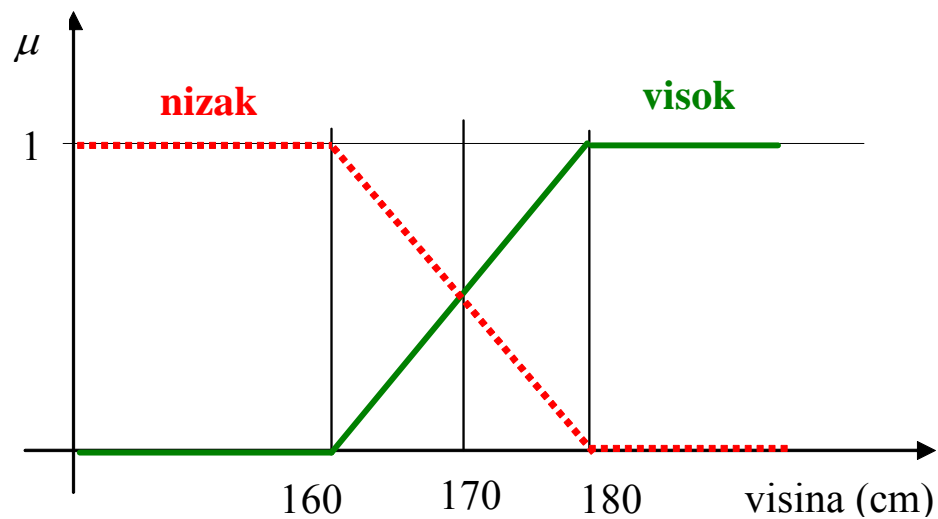


# Neizrazita logika

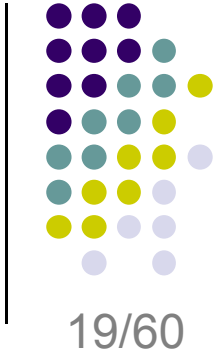
- Primjer klasičnog i neizrazitog skupa visokih ljudi



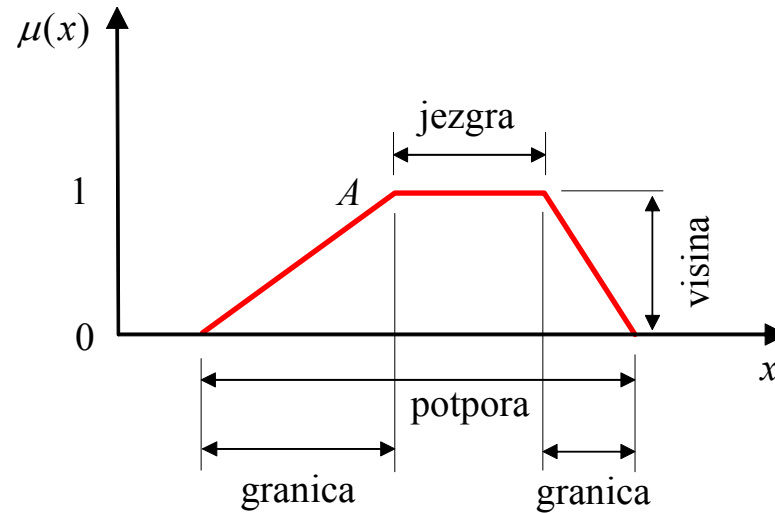
- Istovremena pripadnost većem broju skupova



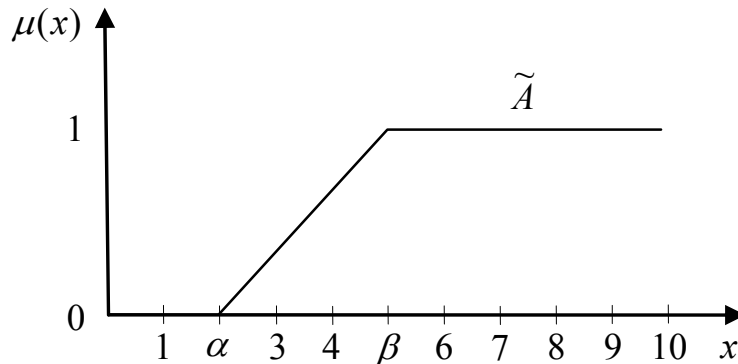
# Neizrazita logika



- Parametri neizrazitog skupa:



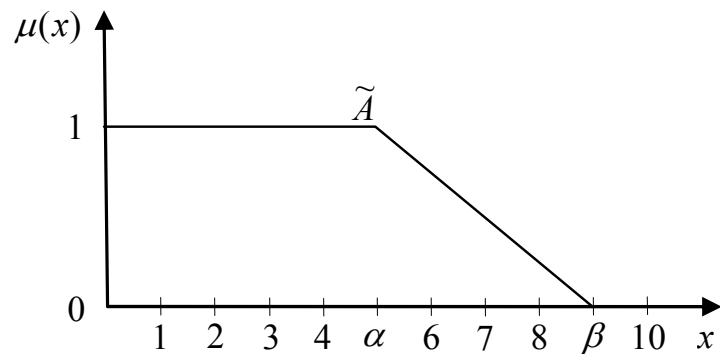
- Primjeri neizrazitih skupova (funkcija pripadnosti)



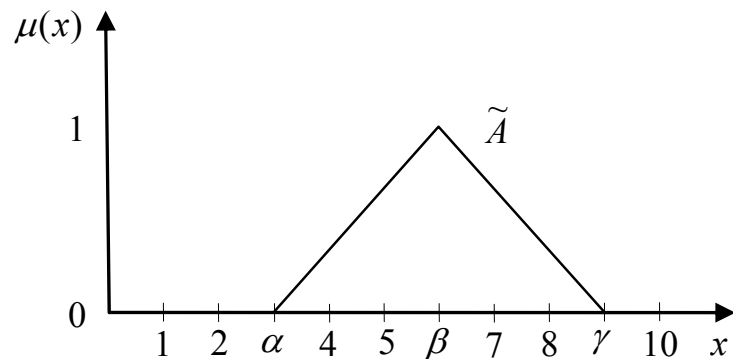
$$\Gamma(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha, \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta, \\ 1 & x > \beta. \end{cases}$$

# Neizrazita logika

- Primjeri neizrazitih skupova (funkcija pripadnosti)



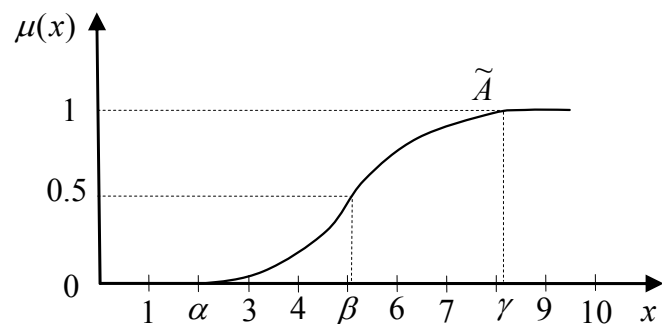
$$L(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 & x < \alpha, \\ (\beta - x)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta, \\ 0 & x > \beta. \end{cases}$$



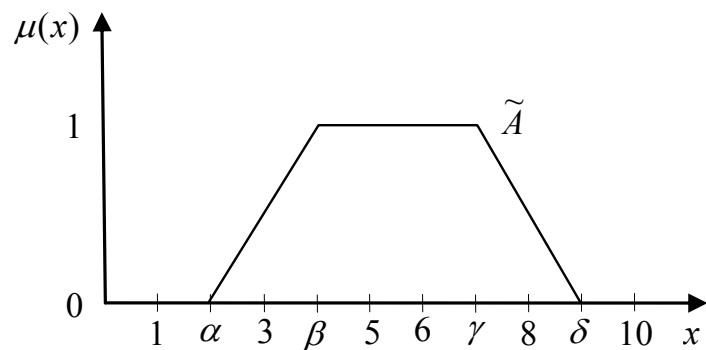
$$\Lambda(x; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0 & x < \alpha, \\ (x - \alpha)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta, \\ (\beta - x)/(\beta - \alpha) & \beta \leq x \leq \gamma, \\ 0 & x > \gamma. \end{cases}$$

# Neizrazita logika

- Primjeri neizrazitih skupova (funkcija pripadnosti)



$$S(x; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha, \\ 2((x - \alpha)/(\gamma - \alpha))^2 & \alpha < x \leq \beta, \\ 1 - 2((x - \gamma)/(\gamma - \alpha))^2 & \beta < x \leq \gamma, \\ 1 & x > \gamma. \end{cases}$$



$$\Pi(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha, \\ (x - \alpha)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x < \beta, \\ 1 & \beta \leq x < \gamma, \\ (\delta - x)/(\delta - \gamma) & \gamma \leq x \leq \delta, \\ 0 & x > \delta. \end{cases}$$

# Neizrazita logika



- Operacije nad neizrazitim skupovima:

a) Unija:

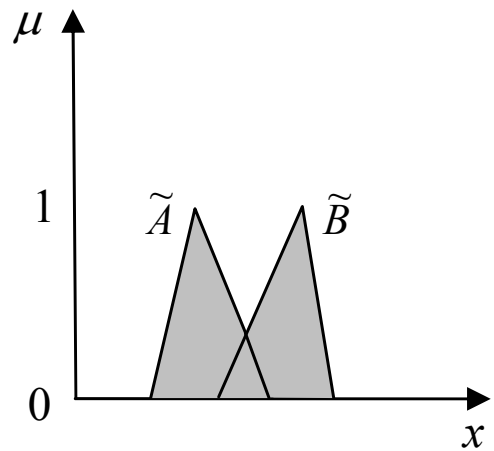
$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))$$

b) Presjek:

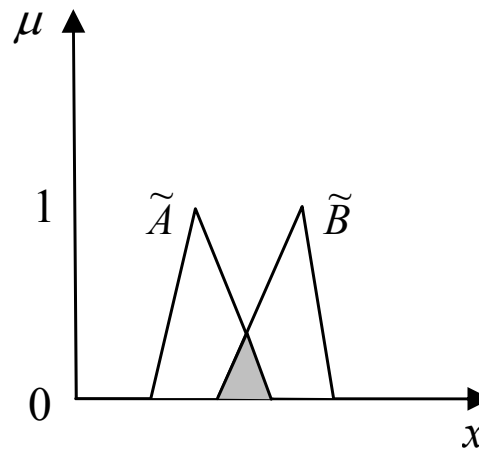
$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))$$

c) Komplement

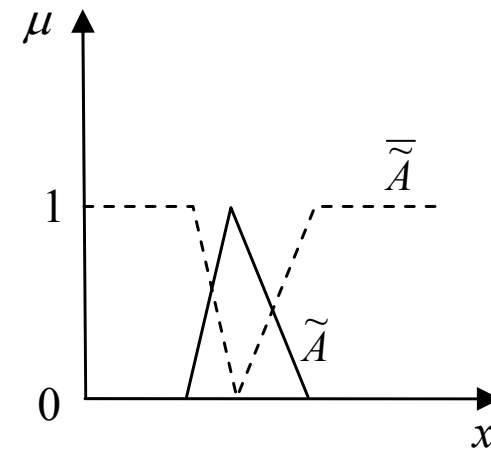
$$\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$$



(a)



(b)



(c)

# Neizrazita logika



- Primjer operacija nad neizrazitim skupovima:

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{1}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{0.4}{5} + \frac{0.2}{6} \right\} \quad \text{i} \quad \tilde{B} = \left\{ \frac{0.6}{3} + \frac{0.8}{4} + \frac{0.3}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$$

Komplement:  $\overline{\tilde{A}} = \left\{ \frac{1}{1} + \frac{0}{3} + \frac{0.3}{4} + \frac{0.6}{5} + \frac{0.8}{6} \right\}$        $\overline{\tilde{B}} = \left\{ \frac{1}{1} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.2}{4} + \frac{0.7}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$

Unija i presjek:  $\tilde{A} \cup \tilde{B} = \left\{ \frac{1}{3} + \frac{0.8}{4} + \frac{0.4}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$        $\tilde{A} \cap \tilde{B} = \left\{ \frac{0.6}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{0.3}{5} + \frac{0.2}{6} \right\}$

Razlika:  $\tilde{B} \setminus \tilde{A} = \tilde{B} \cap \overline{\tilde{A}} = \left\{ \frac{0}{3} + \frac{0.3}{4} + \frac{0.3}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$

De Morganovi zakoni:  $\overline{\tilde{A} \cup \tilde{B}} = \overline{\tilde{A}} \cap \overline{\tilde{B}} = \left\{ \frac{1}{1} + \frac{0}{3} + \frac{0.2}{4} + \frac{0.6}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$        $\overline{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \overline{\tilde{A}} \cup \overline{\tilde{B}} = \left\{ \frac{1}{1} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.3}{4} + \frac{0.7}{5} + \frac{0.8}{6} \right\}$

Zakon isključenja trećeg:  $\overline{\tilde{A}} \cup \tilde{A} = \left\{ \frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{0.6}{5} + \frac{0.8}{6} \right\}$        $\overline{\tilde{B}} \cap \tilde{B} = \left\{ \frac{0.4}{3} + \frac{0.2}{4} + \frac{0.3}{5} + \frac{0.5}{6} \right\}$

# Neizrazita logika

## Neizraziti operatori

- Kao operatori neizrazitih skupova najčešće se koriste trokutaste norme.
- Kod neizrazitih skupova trokutaste norme se koriste za modeliranje operatora koji predstavljaju uniju i presjek.
- **T-norma** za modeliranje operacije presjeka:

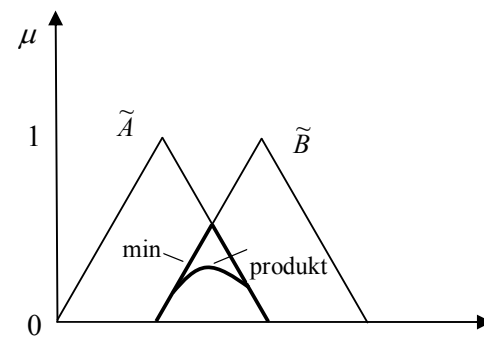
$$T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$T(\tilde{A}, \tilde{B}) = \tilde{A} \otimes \tilde{B} = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))$$

- U procesu sinteze neizrazitih regulatora najviše se koriste:

Min i produkt  
T-norme:

1.  $\min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}})$ ,
2.  $\mu_{\tilde{A}} * \mu_{\tilde{B}}$ .





# Neizrazita logika

## Neizraziti operatori

- Preslikavanje:

$$S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

predstavlja *S*-normu, ili *T*-konormu, ako i samo ako je ono simetrično, asocijativno, monotono i  $T(\alpha,1)=\alpha$  za svaki  $\alpha \in [0,1]$ .

- Primjeri najviše korištenih *S*-normi:

1.  $\max(a,b)$ ,
2.  $(a + b - a * b)$ .

- *max* operator je najmanji od svih mogućih *S*-norma operatora:

$$S(a,b) \geq \max(a,b)$$



# Neizrazita logika

## Neizrazite relacije

- Općenito, relacija definira skup uređenih parova, tj. skup svih uređenih parova realnih brojeva  $x$  i  $y$  takvih da je  $x \geq y$ .
- Relacije predstavljaju preslikavanja skupova i veoma su korisne u prikazu logičkih veza.
- *Neka su  $X$  i  $Y$  dva neprazna skupa. Neizrazita relacija  $\tilde{R}$  je neizraziti podskup od  $X \times Y$ , odnosno:*

$$\tilde{R} = F(X \times Y)$$

ili

$$\tilde{R} = \{((x, y), \mu_{\tilde{R}}(x, y)) \mid (x, y) \in X \times Y\}$$

- Ako je  $X=Y$ , tada se za  $\tilde{R}$  kaže da je neizrazita binarna relacija u  $X$ -u.



# Neizrazita logika

## Operacije nad neizrazitim relacijama



27/60

- *Unija:*  $\mu_{\tilde{R} \cup \tilde{S}}(x, y) = \max(\mu_{\tilde{R}}(x, y), \mu_{\tilde{S}}(x, y))$
- *Presjek:*  $\mu_{\tilde{R} \cap \tilde{S}}(x, y) = \min(\mu_{\tilde{R}}(x, y), \mu_{\tilde{S}}(x, y))$
- *Komplement:*  $\mu_{\tilde{R}^c}(x, y) = 1 - \mu_{\tilde{R}}(x, y)$
- *Zadržavanje:*  $\tilde{R} \subset \tilde{S} \Rightarrow \mu_{\tilde{R}}(x, y) \leq \mu_{\tilde{S}}(x, y)$

## 12.2. Približno zaključivanje

- Približno zaključivanje je najpoznatiji oblik neizrazite logike i obuhvaća različita pravila zaključivanja čije premise sadrže neizrazite propozicije.
- Približno zaključivanje se razlikuje od zaključivanja u klasičnoj logici.
- Ono se obavlja sa neizrazitim skupovima koji predstavljaju značenje izvjesnog skupa neizrazitih propozicija.
- Npr. ako su zadane funkcije pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}$  i  $\mu_{\tilde{B}}$  koje predstavljaju značenje *neizrazite propozicije*:

" $x$  je  $\tilde{A}$ "

- i značenje neizrazitog pravila

"*AKO*  $x$  je  $\tilde{A}$  *ONDA*  $y$  je  $\tilde{B}$ "

## Približno zaključivanje

- Sada se može izračunati funkcija pripadnosti koja predstavlja značenje *zaključka*:

" $y$  je  $\tilde{B}$ "

- Znači zaključak u približnom zaključivanju zavisi od značenja koje je pridruženo neizrazitim propozicijama.
- Općenito zaključivanje je postupak izvođenja novog znanja iz već postojećeg.
- **Pravila tipa "AKO-ONDA" su najvažniji oblik predstavljanja znanja.**
- Približnim zaključivanjem se predstavlja znanje izraženo prirodnim jezikom.

# Približno zaključivanje

- Ako su zadane procesne varijable stanja  $e$  i  $\dot{e}$  i izlazna upravljačka varijabla  $u$ , tada je neizrazito pravilo:

*AKO  $e$  je NV I  $\dot{e}$  je PV ONDA  $u$  je NM*

- Simbolički izraz slijedeće kauzalne veze u prirodnoj jezičnoj formi glasi:

- *ako* je u slučaju da je trenutna vrijednost  $e$  negativno velika  $i$  trenutna vrijednost  $\dot{e}$  pozitivno velika *onda* ovo uzrokuje malo smanjenje prethodne vrijednosti upravljačkog izlaza  $u$ ,

IIi

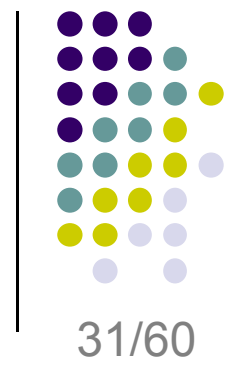
- *ako* je u slučaju da trenutna pogreške ima svojstvo negativno velike vrijednosti  $i$  trenutno posljednja promjena pogreške ima svojstvo pozitivno velike vrijednosti *onda* ovo uzrokuje inkrementalnu promjenu upravljačkog izlaza tako da ima svojstvo negativno male vrijednosti.



# Približno zaključivanje

## Grafički postupci zaključivanja

- Grafički postupci zaključivanja:
  - Mamdani max-min,
  - Takagi-Sugeno-Kang, - razradit će se kasnije.
  - Larsenov max-produkt,
  - Tsukamoto postupak.



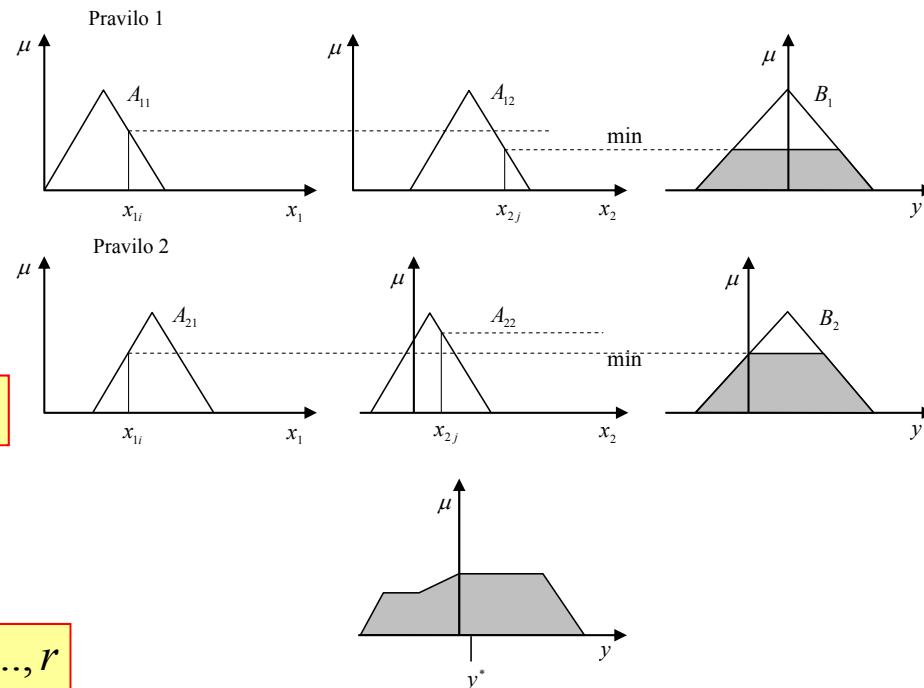
### Mamdani zaključivanje:

- Skup pravila:

*AKO*  $x_1$  je  $\tilde{A}_1^k$  *I*  $x_2$  je  $\tilde{A}_2^k$  *ONDA*  $y^k$  je  $\tilde{B}^k$ ,  $k = 1, \dots, r$

- Izlaz neizrazitog sistema:

$$\mu_{\tilde{B}^k} = \max_k \{ \min [ \mu_{\tilde{A}_1^k}(x_{1i}), \mu_{\tilde{A}_2^k}(x_{2j}) ] \}, \quad k = 1, \dots, r$$

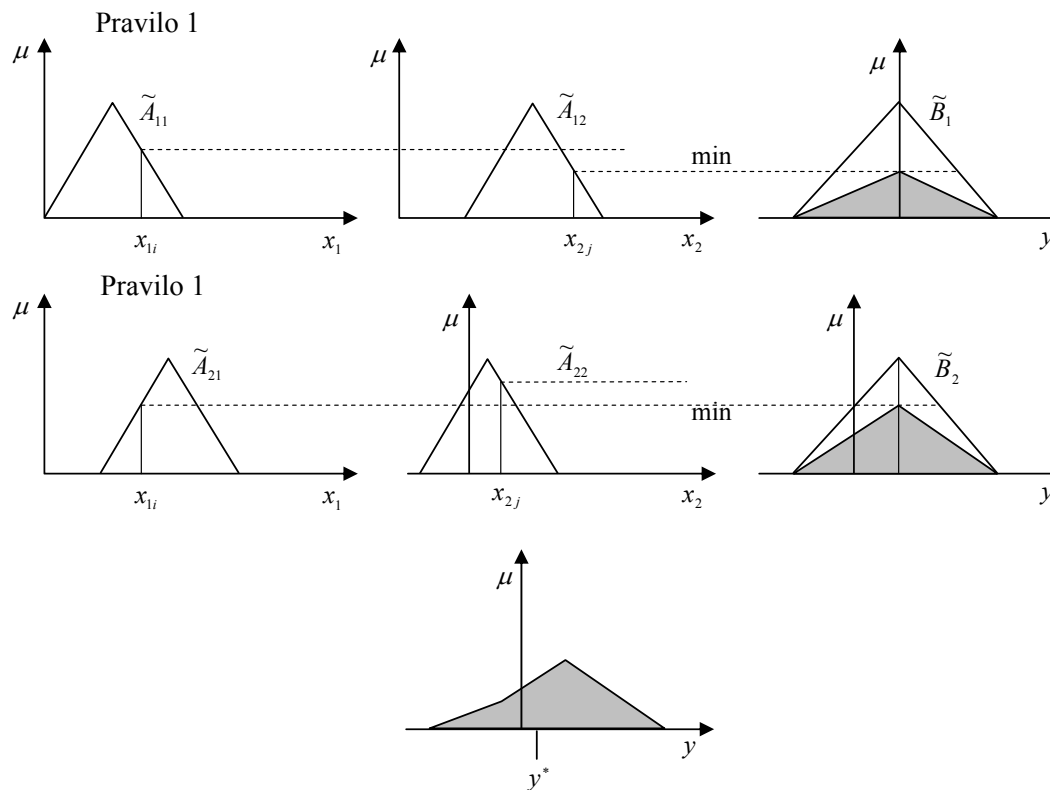


# Približno zaključivanje

## Grafički postupci zaključivanja

- Larsenov postupak
- Ukupni izlaz za  $r$  pravila:

$$\mu_{\tilde{B}^k} = \max_k [\mu_{\tilde{A}_1^k}(x_{1i}) \cdot \mu_{\tilde{A}_2^k}(x_{2j})], \quad k = 1, \dots, r$$







# Približno zaključivanje

## Grafički postupci zaključivanja

- **Tsukamotoov postupak**
- Izlaz mehanizma zaključivanja za svako pojedinačno pravilo je realna vrijednost. Ukupan izlaz  $y$  je predstavljen težinskim usrednjavanjem pojedinačnih izlaza  $y_i$ ,  $i=1, \dots, r$ :

$$y = \frac{\alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 + \dots + \alpha_i y_i}{y_1 + y_2 + \dots + y_i}, \quad i = 1, \dots, r$$

gdje je

$$\alpha_k = \min[\mu_{A_1}^k(x_{1i}), \mu_{A_2}^k(x_{2j})], \quad k = 1, \dots, r$$

# Približno zaključivanje

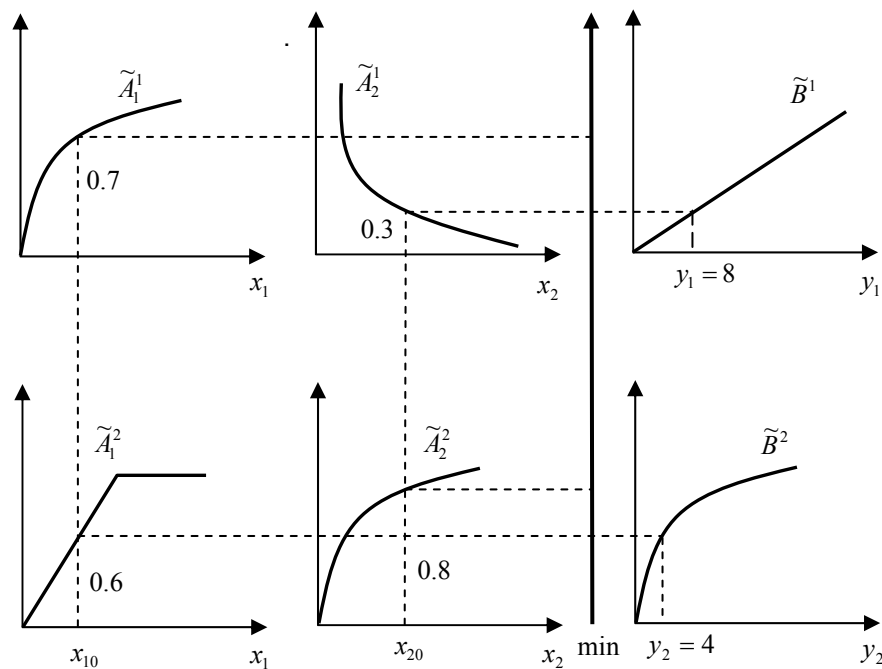
## Grafički postupci zaključivanja

- Tsukamotoov postupak – primjer

$$r^{(1)} : AKO x_1 \text{ je } \tilde{A}_1^1 \text{ I } x_2 \text{ je } \tilde{A}_2^1 \text{ ONDA } y_1 \text{ je } \tilde{B}^1$$

$$r^{(2)} : AKO x \text{ je } \tilde{A}_1^2 \text{ I } y \text{ je } \tilde{A}_2^2 \text{ ONDA } y_2 \text{ je } \tilde{B}^2$$

- Zadano je:  $\tilde{A}_1^1(x_{10}) = 0.7$ ,  $\tilde{A}_2^1(x_{20}) = 0.3$ ,  $\tilde{A}_1^2(x_{10}) = 0.6$ ,  $\tilde{A}_2^2(x_{20}) = 0.8$



## 12.3. Neizraziti regulatori

- **Klasična teorija upravljanja** temelji se na opisu sistema pomoću diferencijalnih jednačbi ili prijenosnih funkcija.
- **Moderna teorija upravljanja** daje matrične diferencijalne jednačbe temeljene na postupcima prostora stanja.
- Obje navedene grupe upravljanja zahtijevaju poznavanje matematičkog modela sistema upravljanja.
- U mnogim slučajevima je jako teško načiniti matematički model sistema zbog njegove složenosti (vremenska promjenjivost i nelinearnost), odnosno upravljački proces je previše složen da bi se analizirao uobičajnim kvantitativnim metodama.
- Nasuprot tome, **neizraziti regulatori ne zahtijevaju poznavanje matematičkog modela sistema**, odnosno postupak sinteze modela primjenom neizrazite logike spada u grupu tehnika slobodnog modela.



# Neizraziti regulatori

- Pri sintezi neizrazitog regulatora projektant treba jezički opisati pravila (engl. rules) kako se izlazna veličina mijenja u odnosu na ulazne.
- Neizrazita pravila su uvjetni iskazi u kojima uzročni dio predstavlja uvjet u domeni njegove primjene, a posljedični dio upravljačko djelovanje na sistem koji se upravlja.
- Do ovih pravila može se doći na temelju čovjekovog iskustva - promatranjem rada iskusnog operatera pri vođenju složenog dinamičkog procesa.
- Zbog višestrukih neizrazitih pravila neizraziti regulatori su pogodni za složene nelinearne sisteme.
- Neizraziti regulatori mogu uz stvarnu regulacijsku veličinu (dodatno i bez problema) uključiti i druge slobodne procesne veličine u zakon regulacije.



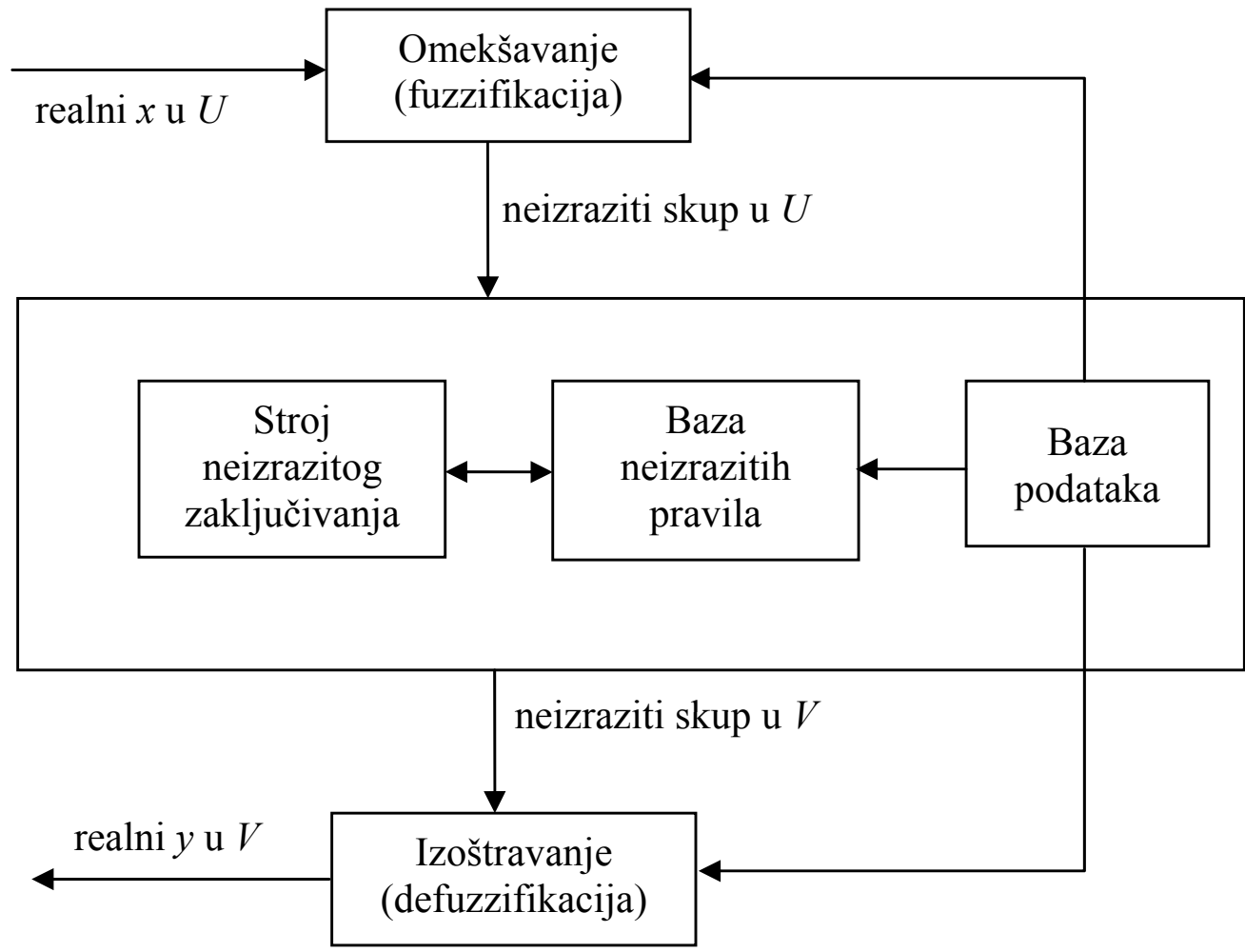
# Neizraziti regulatori

- Važno svojstvo ovog tipa regulatora je **nelinearnost rada, odnosno, nelinearnost karakteristika**.
- Uzroci nelinearnosti leže u osobinama funkcija pripadnosti i pravilima regulacije te u odabranim postupcima odlučivanja i izoštravanju.
- Na ovaj način je omogućeno paralelno i distribuirano upravljanje korištenjem višestrukih neizrazitih pravila, a što je posebno prikladno za složene nelinearne sisteme.
- **Također važna karakteristika neizrazitih regulatora je odsustvo vremenske dinamike u njegovom ponašanju.**



# Neizraziti regulatori

Blok shema neizrazitog regulatora:



# Neizraziti regulatori

## Koraci u sintezi neizrazitog regulatora:

- Određivanje varijabli stanja (ulazi) i upravljačkih varijabli (izlazi).
- Izbor postupka zaključivanja.
- Izbor odgovarajućih skalirajućih koeficijenata za ulazne i izlazne varijable zbog normalizacije varijabli u  $[0,1]$  ili  $[-1,1]$  interval (normalizacija, odnosno denormalizacija).
- Podjela prostora ulaznih i izlaznih varijabli u određeni broj neizrazitih podskupova, pridružujući svakom jezičnu oznaku (podskupovi uključuju sve elemente skupa).
- Pridruživanje ili određivanje funkcija pripadnosti za svaki neizraziti podskup (definiranje oblika funkcija pripadnosti neizrazitih skupova), odnosno postupak omekšavanja.



# Neizraziti regulatori

## Koraci u sintezi neizrazitog regulatora:

- Uspostavljanje neizrazitih veza između ulaza neizrazitih podskupova, s jedne strane i izlaza neizrazitih podskupova, s druge strane, formirajući na taj način bazu pravila (kreiranje baze pravila).
- Upotreba približnog zaključivanja za određivanje izlaza iz svakog pravila.
- Agregacija neizrazitih izlaza preporučenih od svakog pravila.
- Primjena izoštravanja radi dobivanja izrazitog izlaza (realna vrijednost).
- Testiranje i ugađanje.





# Neizraziti regulatori

## Sinteza neizrazitog regulatora za upravljanje servomotorom



41/60

- U ovom primjeru će se prikazati koraci sinteze neizrazitog regulatora.
- Važna karakteristika servomotora jest iskazivanje nelinearnih svojstava.
- S tim u vezi se neizrazita logika nameće kao jedno od rješenja problema upravljanja servomotorom.
- Zadatak upravljanja je okretanje osovine motora na zadanoj vrijednosti bez nestabilnosti.
- Budući da je dinamika servo motora brza, prijelazni proces se završava za nekoliko desetaka milisekundi, za njegovo upravljanje koristit će se neizraziti regulator Sugeno tipa.

# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Izbor ulaznih i izlaznih varijabli:**

- Ulazi:

*pogreška* ( $e$ ), odstupanje stvarne od referentne vrijednosti,

*promjena pogreške* ( $de$ ), odstupanje stvarne od referentne vrijednosti.

- Upravljačka varijabla, odnosno izlaz neizrazitog regulatora je:

*napon* ( $v$ ) primijenjen na proces.

- **Izbor postupka zaključivanja:**

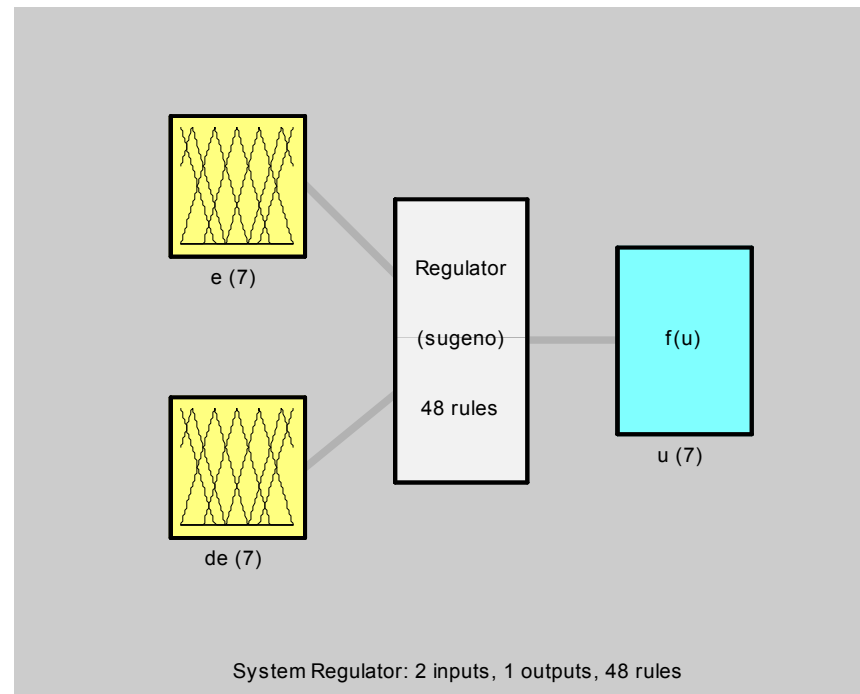
Odabran je Sugeno postupak odlučivanja.



# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Prikaz Sugeno tipa regulatora**



- **Normiranje i denormiranje:**

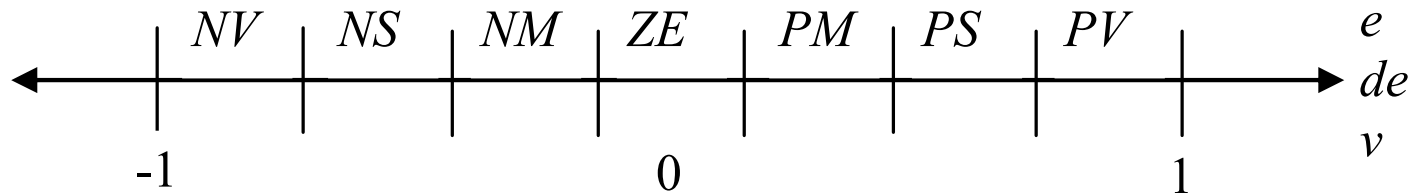
Sve ulazne varijable su normirane na interval  $[-1,1]$ .

Izlazna varijabla također poprima vrijednosti iz navedenog intervala (nema postupka izoštravanja).

# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Podjela ulaznog i izlaznog prostora varijabli**
- Ulazno i izlazno područje će se podijeliti na sedam područja. Svako područje je povezano sa jednim jezičnim izrazom. Maksimalan broj mogućih pravila je 49.
- Jezične oznake neizrazitog skupa su: *NV* – negativno veliko, *NS* – negativno srednje, *NM* – negativno malo, *ZE* – nula, *PV* – pozitivno veliko, *PS* – pozitivno srednje, *PM* – pozitivno malo.



# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Definiranje oblika funkcija pripadnosti neizrazitih skupova**
- Ulazne i izlazne varijable su normirane na interval  $[-1, 1]$ , koji je podijeljen u sedam potpodručja.
- Sada je potrebno definirati osnovne jezične vrijednosti, odnosno osnovne neizrazite skupove (i dodijeliti im odgovarajuće oblike funkcija pripadnosti).
- Za ulazne varijable se koriste trokutasti oblici funkcija pripadnosti, a za izlaznu varijablu singleton.

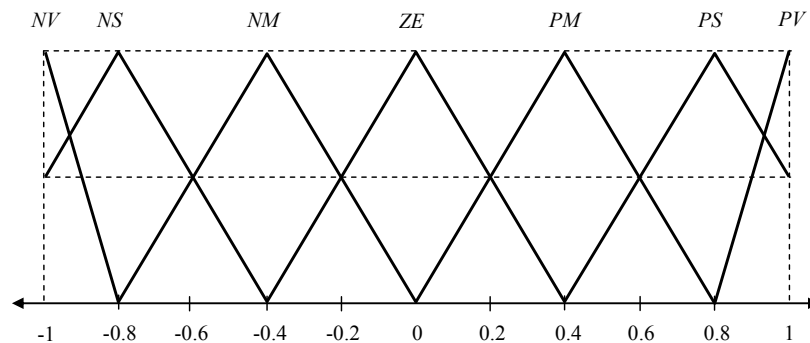


# Neizraziti regulatori

## Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- Definicija osnovnih neizrazitih skupova

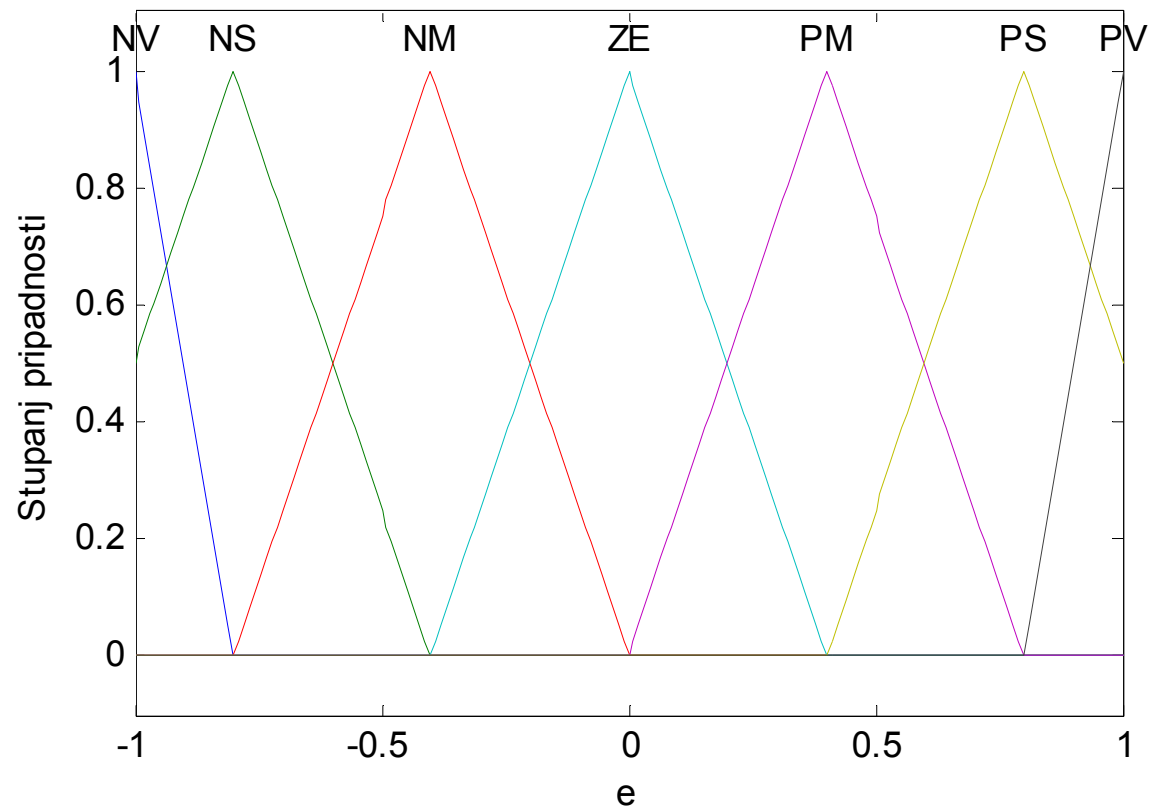
| Razina | <i>NV</i> | <i>NS</i> | <i>NM</i> | <i>ZE</i> | <i>PM</i> | <i>PS</i> | <i>PV</i> |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -1     | 1         | 0.5       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| -0.8   | 0         | 1         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| -0.6   | 0         | 0.5       | 0.5       | 0         | 0         | 0         | 0         |
| -0.4   | 0         | 0         | 1         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| -0.2   | 0         | 0         | 0.5       | 0.5       | 0         | 0         | 0         |
| 0      | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         | 0         | 0         |
| 0.2    | 0         | 0         | 0         | 0.5       | 0.5       | 0         | 0         |
| 0.4    | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         | 0         |
| 0.6    | 0         | 0         | 0         | 0         | 0.5       | 0.5       | 0         |
| 0.8    | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         |
| 1      | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0.5       | 1         |



# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Omekšavanje (fuzzyfikacija) ulaznih varijabli**
- Ulazne varijable pogreška i promjena pogreške imaju iste neizrazite skupove, odnosno funkcije pripadnosti.



# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Definiranje neizrazitih pravila**
- Baza pravila:
  - AKO *e* je PV i *de* je bilo kakav ONDA *v* je PV,
  - AKO *e* je PV i *de* je NV, NS, ili NM ONDA *v* je PM,
  - AKO *e* je ZE i *de* je ZE, PM, ili PS ONDA *v* je ZE,
  - AKO *e* je PM i *de* je NM, ZE, ili PM ONDA *v* je ZE,
  - AKO *e* je NM i *de* je NM, ZE, PM, ili PS ONDA *v* je NM,
  - AKO *e* je NM ili ZE i *de* je PV ONDA *v* je PM,

Tablica  
neizrazitih  
pravila:

| <i>e/de</i> | NV | NS | NM | ZE | PM | PS | PV |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NV          | NV | NV | NV | NV | NV | NV | NV |
| NS          | NS | NS | NS | NV | NV | NV | NV |
| NM          | NS | NS | NM | NM | NM | NM | PM |
| ZE          | NM | NM | NM | ZE | ZE | ZE | PM |
| PM          | NM | NM | ZE | ZE | ZE | PS | PS |
| PS          | PV | PM | PM | PS | PS | PS | PS |
| PV          | PV | PV | PV | PV | PV | PV | PV |



# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Upotreba približnog zaključivanja za određivanje izlaza iz svakog pravila i agregacija neizrazitih izlaza preporučenih od svakog pravila**
- Zaključivanje koristi bazu neizrazitih pravila i kompozicijsko pravilo zaključivanja.
- Sugeno tip zaključivanja je opisan izrazom:

$$\begin{aligned}
 r^{(1)} &: AKO (x_1 \text{ is } \tilde{A}_1^1) I \dots I (x_n \text{ is } \tilde{A}_n^1) ONDA u_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 &\vdots \\
 r^{(m)} &: AKO (x_1 \text{ is } \tilde{A}_1^m) I \dots I (x_n \text{ is } \tilde{A}_n^m) ONDA u_m = f_m(x_1, x_2, \dots, x_n)
 \end{aligned}$$

dok se izlaz regulatora računa kao težinsku normiranu sumu svih parova, u skladu sa izrazom:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{u_i} \cdot u_i^*}{\sum_{i=1}^m \mu_{u_i}}$$

# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- **Postupak izoštravanja**
- Kod Sugeno tipa neizrazitog regulatora izlazne vrijednosti se dobivaju u izrazitom obliku, te nije potreban postupak izoštravanja.
- Kod Mamdanija se ovaj postupak provodi, odnosno neizrazite vrijednosti izlaznih varijabli se preslikavaju u izrazite vrijednosti korištenjem nekog od postupaka izoštravanja.
- **Testiranje i ugađanje**
- Provjeravanje performansi neizrazitog sistema i podešavanje pravila prema potrebi.
- Pravila odlučivanja formiraju diskretne razine upravljanja za pojedine kombinacije ulaznih varijabli.

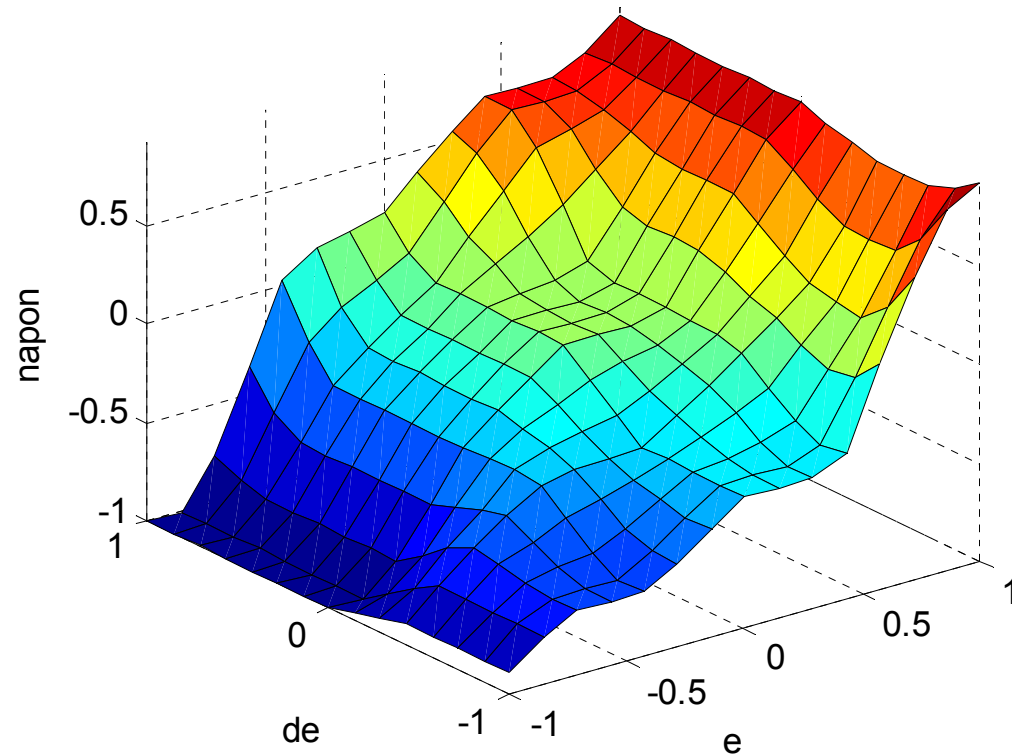
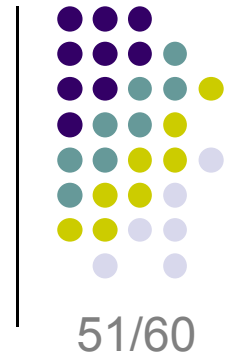


50/60

# Neizraziti regulatori

Proces sinteze neizrazitog regulatora:

- Znanje eksperta ili poznavanje fizikalnosti procesa mogu pomoći prilikom definiranja ovih pravila.
- Kombinirani proces omekšavanja, odlučivanja i izoštravanja djeluju tako da interpoliraju ove razine upravljanja tako da daju glatki prijelaz nelinearnog zakona upravljanja u prostoru definicije ulaznih varijabli (kvadrat  $K = [-1,1] \times [-1,1]$ ).

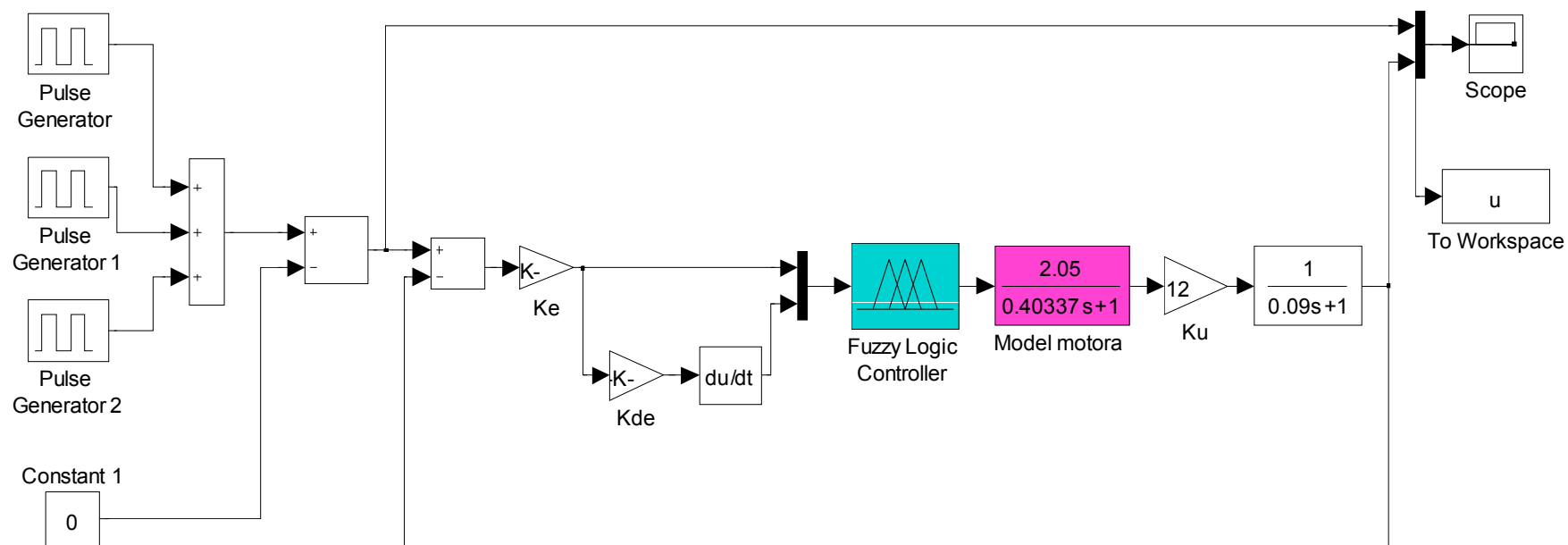


Upravljačka površina Sugenovog regulatora

# Neizraziti regulatori

## Simulacijski rezultati

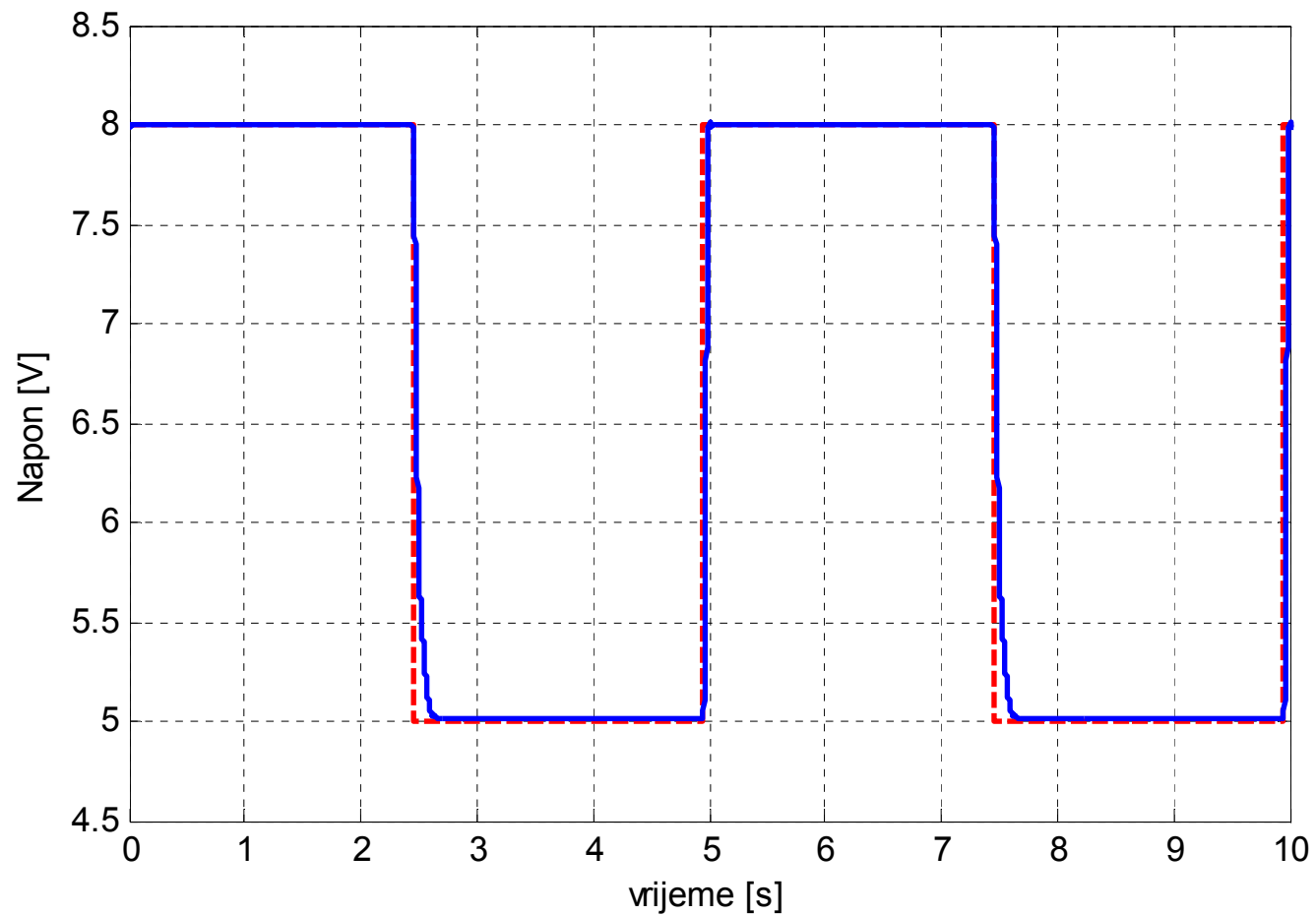
Simulacijska shema sa identificiranim modelom motora.



# Neizraziti regulatori

## Simulacijski rezultati

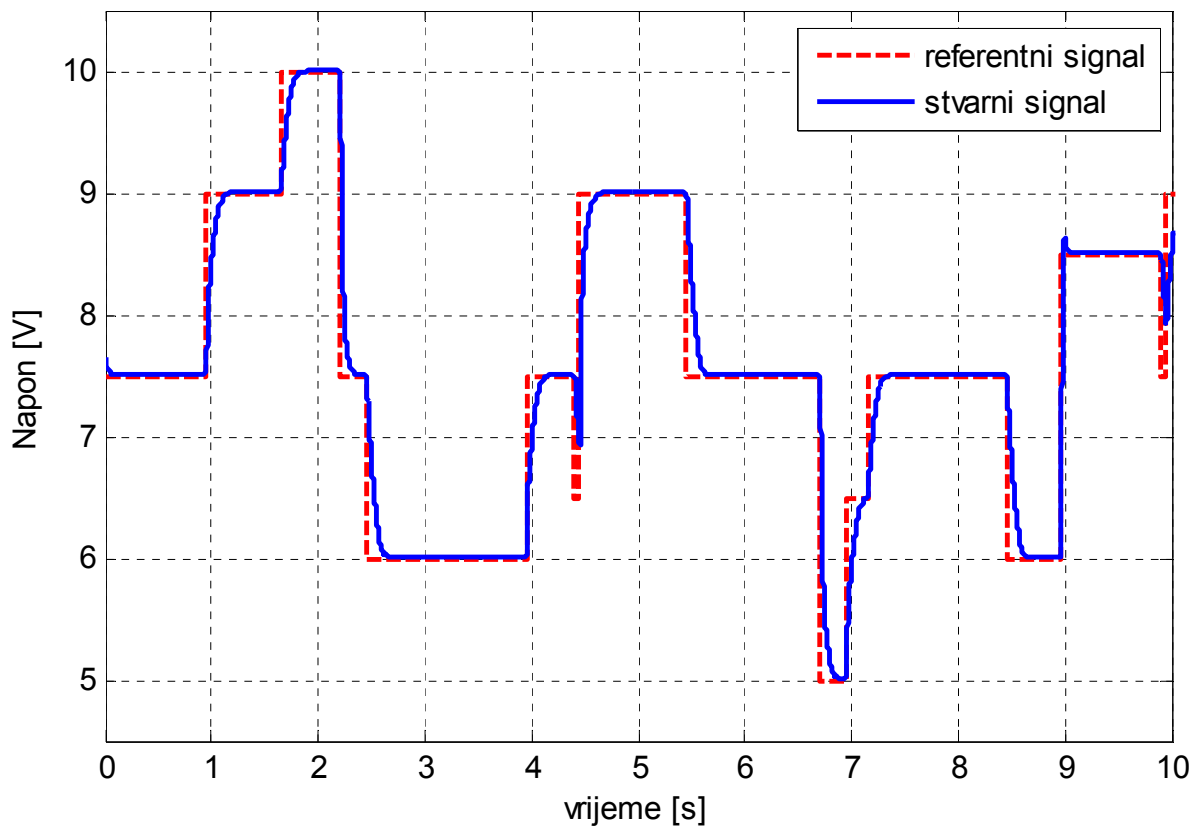
Odziv modela na niz četvrtki



# Neizraziti regulatori

## Simulacijski rezultati

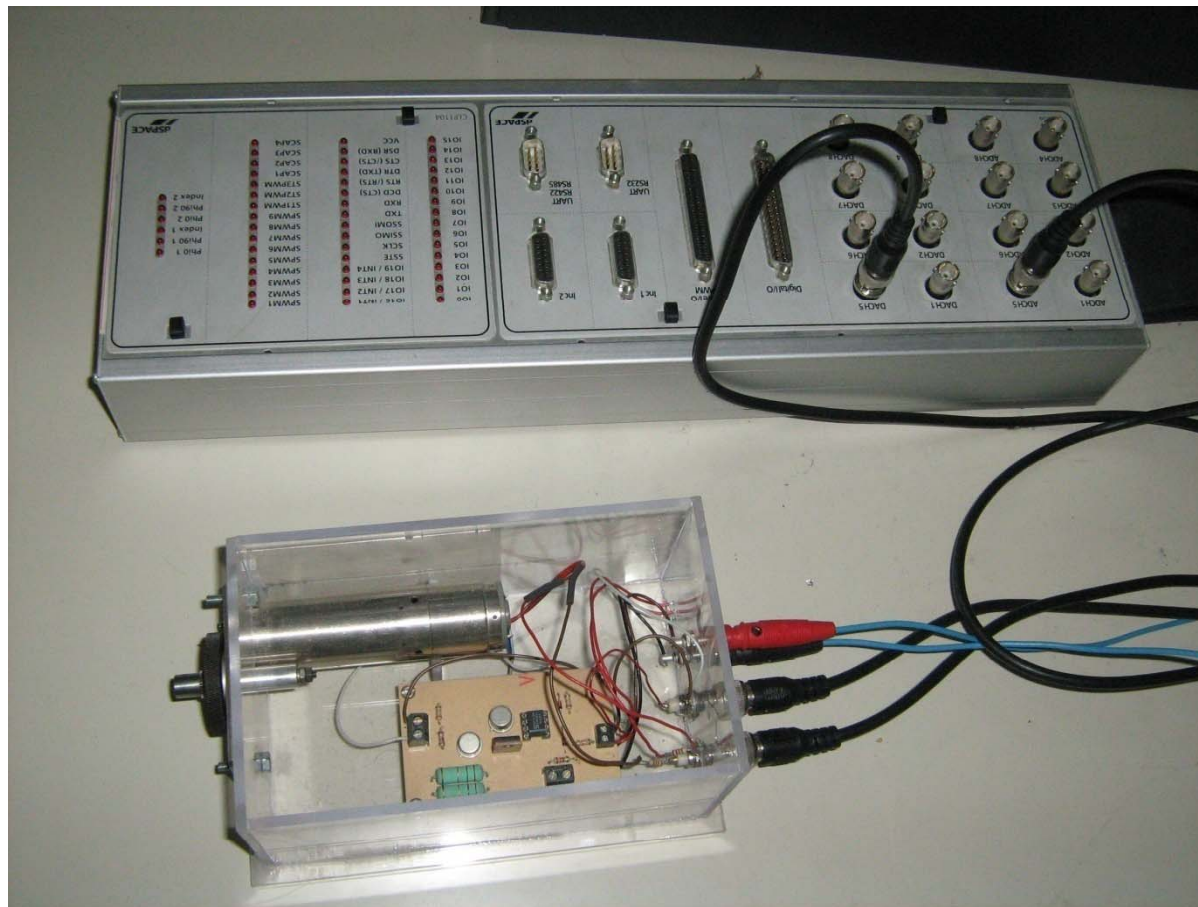
Odziv modela na signal bijelog šuma sa ograničenim opsegom



# Neizraziti regulatori

## Eksperimentalni rezultati

Maketa sa fizičkim modelom motora



# Neizraziti regulatori

## Eksperimentalni rezultati

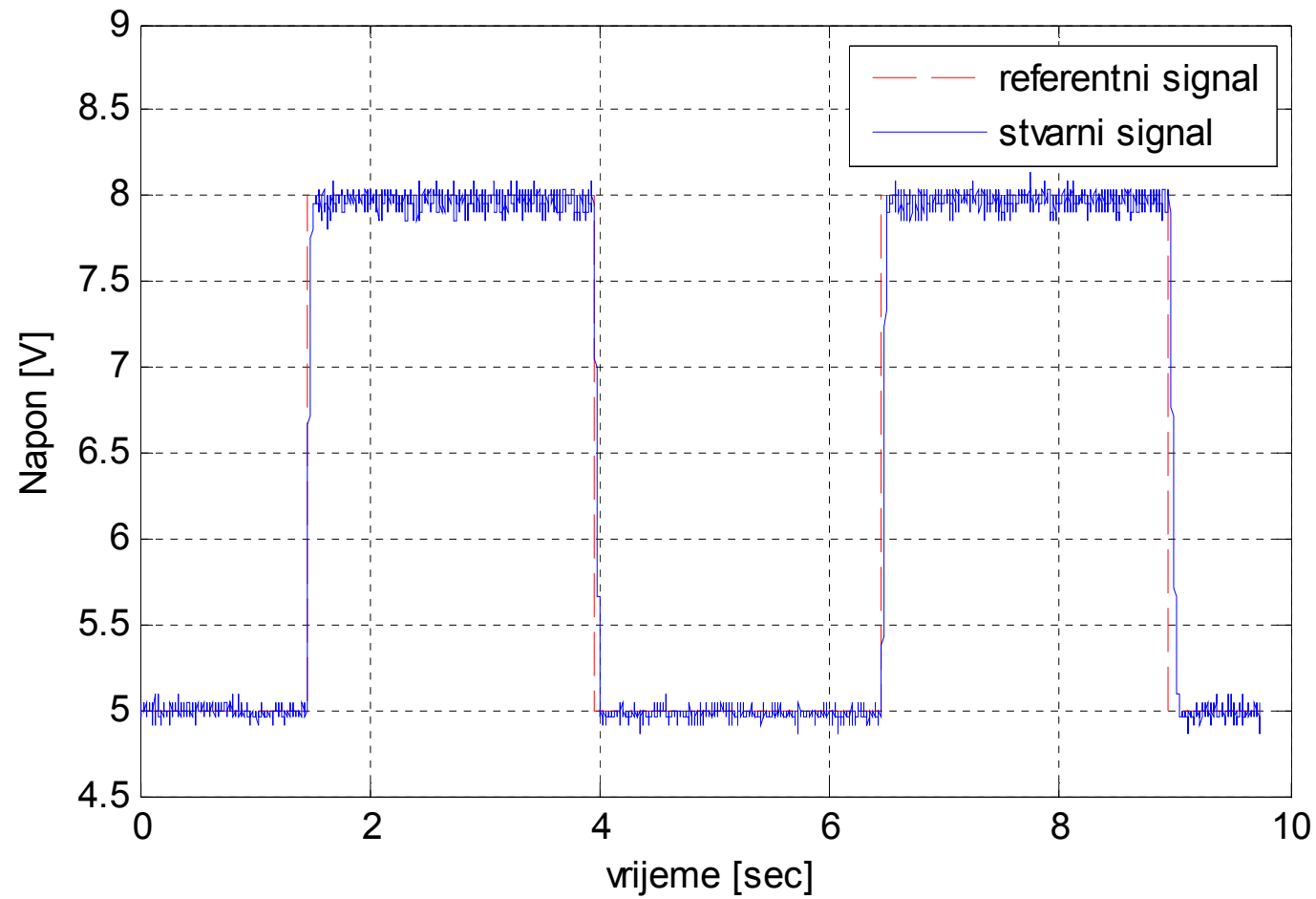
- Treba uzeti u obzir pri razmatranju kvalitete regulacije, da:
  - **pojačalo snage unosi nelinearnost u sistem upravljanja motorom**
  - **postoje značajni šumovi mjerenja signala napona**
  - **na osovini postoji sistem zupčanika koji usporava brzinu vrtnje osovine**
  - **motor ima veliku mrtvu zonu (od 0-5 V motor ne reagira na ulaznu pobudu).**
- Prema tome cjelokupan sistem: motor + pojačalo snage + zupčanik (tahogenerator) predstavljaju složen i nelinearan sistem.





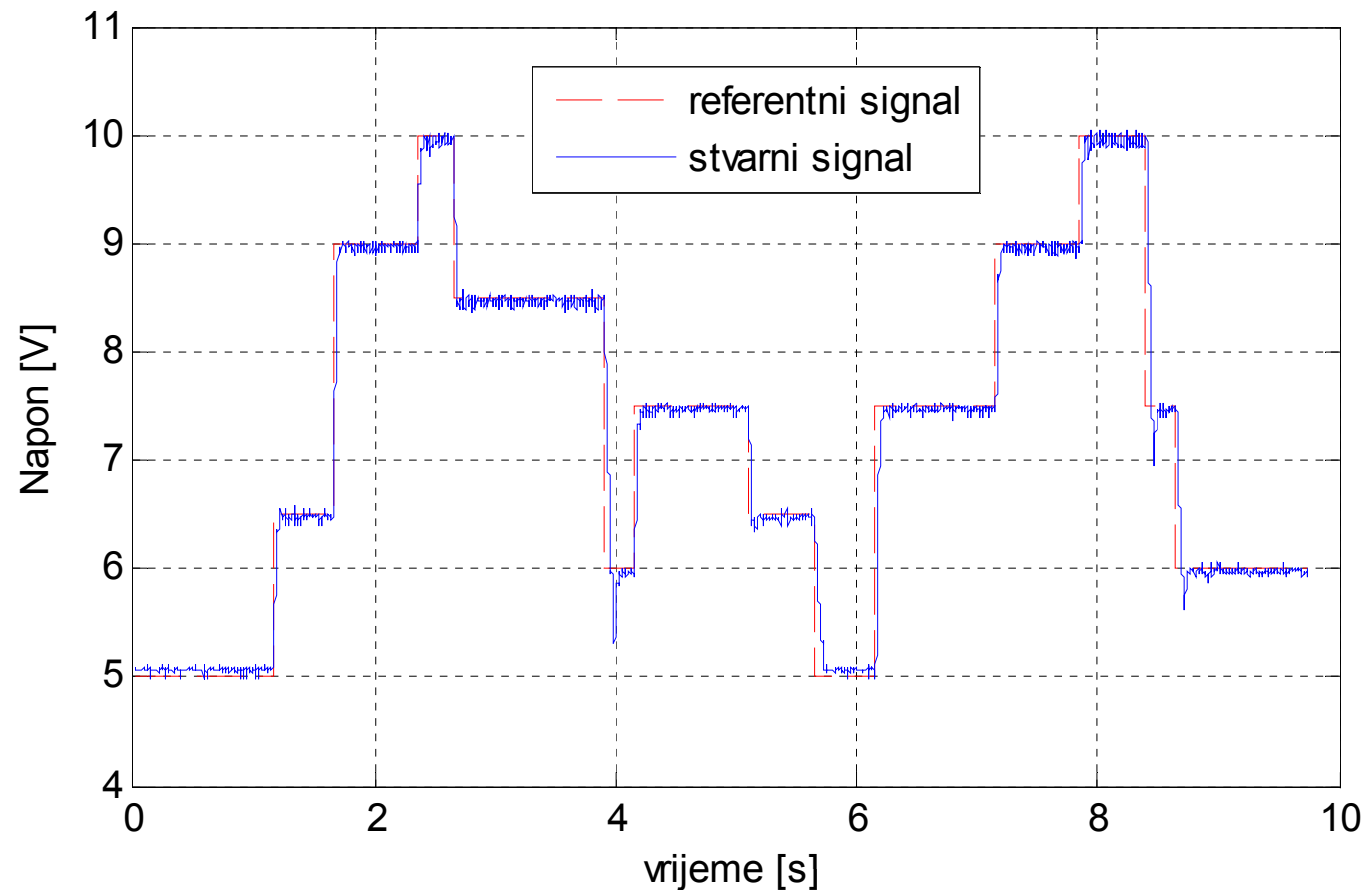
# Neizraziti regulatori

## Eksperimentalni rezultati



# Neizraziti regulatori

## Eksperimentalni rezultati



# Neizraziti regulatori

## Izoštavanje neizrazitih vrijednosti

- Za razliku od Sugeno regulatora, Mamdani tip regulatora nakon postupka zaključivanja koristi mehanizam preslikavanja izlaznih neizrazitih vrijednosti regulatora u izrazite, odnosno, realne vrijednosti - izoštavanje (defuzzyfikacija).
- Najpoznatiji i najviše korišteni postupci izoštavanja su:
  - **Princip maksimuma pripadnosti** (*engl. max-membership principle*), ili postupak visine (*engl. height method*).
  - **Centroid metoda** (*engl. centroid method*), još se naziva centar područja (*engl. center of area*) i centar gravitacije (*engl. center of gravity*).
  - **Postupak srednjeg otežavanja** (*engl. weighted average method*).
  - **Sredina maksimuma** (*engl. middle-of-maxima*).
  - **Centar zbroja** (*engl. center of sums*).
  - **Centar najvećeg područja** (*engl. center of largest area*).
  - **Prvi (ili zadnji) maksimum** (*engl. first (or last) maxima*).



# Neizraziti regulatori

## Postupak centra gravitacije (centroid)

- Računanje izrazite (realne) vrijednosti:

Kontinuiran slučaj: 
$$y^* = \frac{\int_Y \mu_{\tilde{B}}(y) \cdot y dy}{\int_Y \mu_{\tilde{B}}(y) dy} = \frac{\int_Y \max_k \mu_{\tilde{B}^k}(y) \cdot y dy}{\int_Y \max_k \mu_{\tilde{B}^k}(y) dy}$$

Diskretni slučaj: 
$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_{\tilde{B}}(y^i) \cdot y^i}{\sum_{i=1}^r \mu_{\tilde{B}}(y^i)} = \frac{\sum_{i=1}^r \max_k \mu_{\tilde{B}^k}(y^i) \cdot y^i}{\sum_{i=1}^r \max_k \mu_{\tilde{B}^k}(y^i)}$$

