

REGULACIJSKI ALGORITMI

- delitev glede na energijo, ki jo potrebujejo za delovanje

a) regulatorji brez pomožne energije (samodelujoči);

- izdelujejo se masovno in so poceni
- so zanesljivi in izpolnjujejo varnostne zahteve
- območje signalov je omejeno in neprilagodljivo
- dinamične lastnosti so zelo omejene (proporcionalna karakteristika)
- slabša točnost, posegi v zanko niso možni – ni modularnosti

b) regulatorji s pomožno energijo; za delovanje je potrebna dodatna pomožna energija

- so bolj splošno namenski
- dražji
- območje signalov je prilagodljivo
- dinamične lastnosti so raznovrstne
- omogočajo veliko točnost
- poseg v zanko je možen, zato omogočajo veliko modularnost

- delitev glede na vrsto medija ali uporabljene pomožne energije

- mehanski
- pnevmatski
- hidravlični
- električni

- delitev električnih regulatorjev

- analogni; izvedeni so z električnimi oz. elektronskimi komponentami
- digitalni; izvedeni so s sodobnimi računalniškimi komponentami

- delitev glede na vrsto regulirnega signala

a) **zvezno delujoči regulatorji**; regulirna veličina lahko zavzame poljubno vrednost znotraj regulirnega območja, regulacija je zelo točna; delitev zveznih regulatorjev glede na dinamične značilnosti:

- proporcionalni **P**
- proporcionalno - integrirni **PI**
- proporcionalno - diferencirni **PD**
- proporcionalno - integrirno – diferencirni **PID**

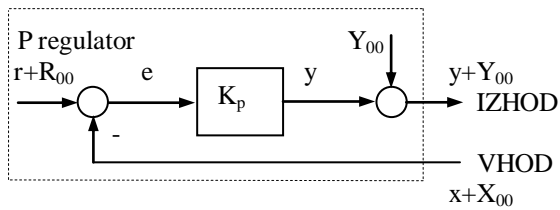
b) **stopenjsko (nezvezno) delujoči regulatorji**; regulirna veličina lahko zavzame samo dve ali tri različne vrednosti

- dvopoložajni **ON – OFF**
- tropoložajni

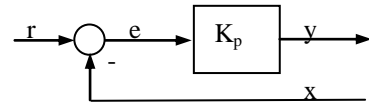
c) **mehki regulatorji (fuzzy)**

Regulator s proporcionalnimi lastnostmi – P regulator

Sistem z absolutnimi veličinami:



Sistem v delovni točki:



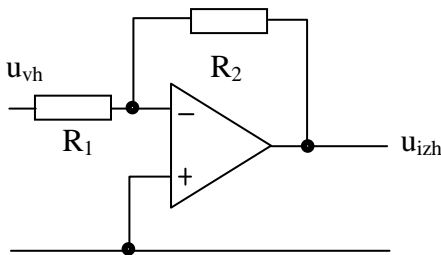
R_{00} – želena vrednost; Y_{00} – delovna vrednost; K_p - ojačanje

$$y(t) = K_p \cdot e(t) = (Y_H / X_R) \cdot e(t)$$

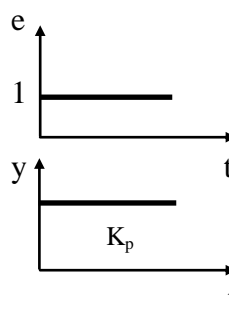
Y_H – največja možna vrednost regulirne veličine, kjer veljajo linearne razmere

X_R – regulacijsko območje regulatorja: P območje

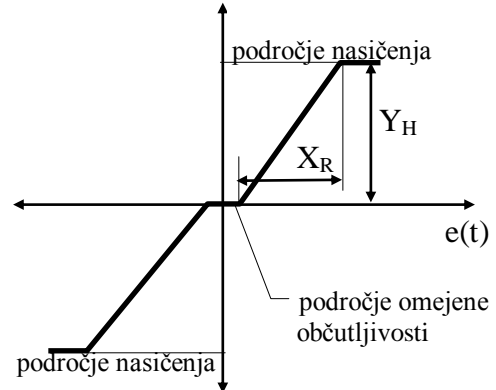
Elektronsko vezje: $K_p = -R_2 / R_1$



Odziv na stopnico:



$y(t)$ **Statična karakteristika:**



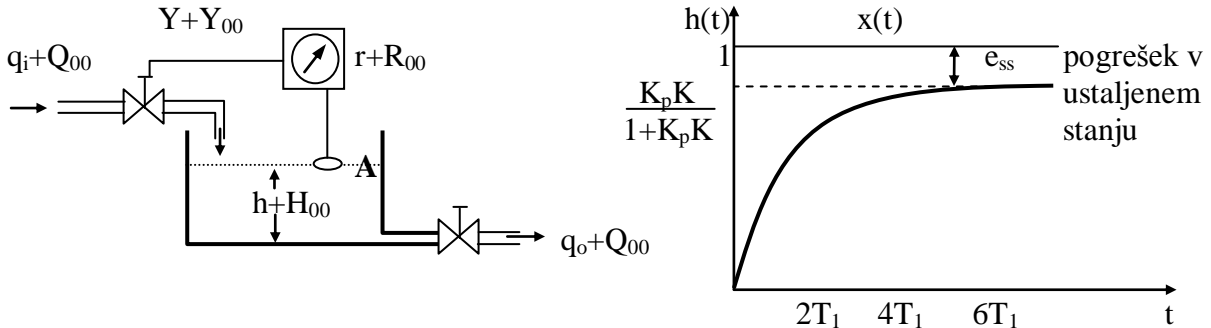
Značilne lastnosti:

- delovanje regulatorja brez zakasnitve
- nastavljanje želene vrednosti, ojačenja K_p in delovne vrednosti regulirne veličine
- proporcionalno območje regulatorja **PB** (proportional band); območje regulirane veličine ali pogreška, ki izkoristi 100% regulirno veličino
- zapis proporcionalnega algoritma:
$$K_p = \frac{y}{e} = \frac{Y_{\max}}{PB} = \frac{100\%}{PB(\%)}; \quad y(t) = \frac{100\%}{PB(\%)} \cdot e(t)$$
- stacionarni pogrešek; ob stopnični spremembi vhodne funkcije je odvisen od ojačenja regulatorja

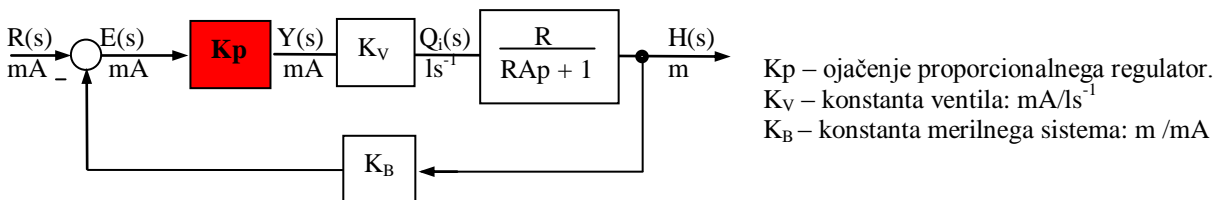
$$e_s = \frac{K_S K_p}{1 + K_S K_p}$$

Proporcionalna regulacija nivoja hidravličnega proporcionalnega sistema 1. reda

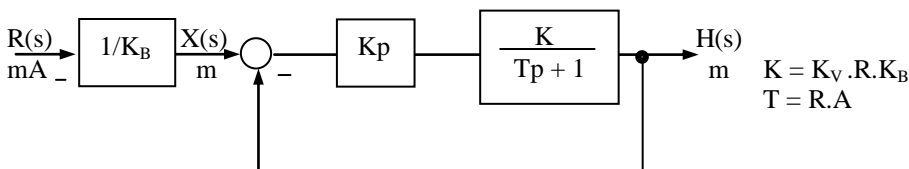
Hidravlični regulacijski sistem:



Blok diagram sistema:



Poenostavljeni blok diagram sistema:



Zveza med želenim nivojem $x(t)$ in regulirano veličino $h(t)$ pri stopničastem poteku spremenljivke $x(t)$:

$$\frac{H(s)}{X(s)} = \frac{K_p K}{sT + 1 + K_p K}; \quad X(s) = \frac{1}{s}; \quad h(t) = \frac{K_p K}{1 + K_p K} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right); \quad T_1 = \frac{T}{1 + K_p K}; \quad e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p K}$$

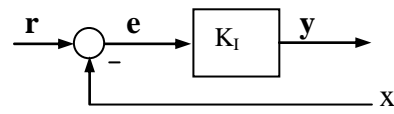
Regulacijski sistem je za faktor e_{ss} zmanjšal časovno konstanto. Pogrešek v ustaljenem stanju:

$$e_{ss} = x_{ss} - h_{ss} = 1 - \frac{K_p K}{1 + K_p K} = \frac{1}{1 + K_p K} = \frac{1}{1 + K_p'}$$

K_p' ... konstanta pozicijskega pogreška

Regulator z integralnimi lastnostmi – I regulator

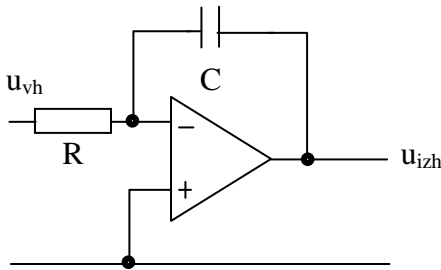
Integrirni regulator je potreben tam, kjer ne želimo pogreška v ustaljenem stanju. Hitrost regulirne veličine je proporcionalna pogrešku e !



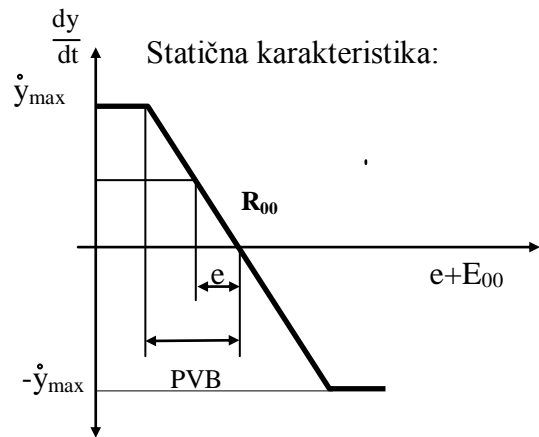
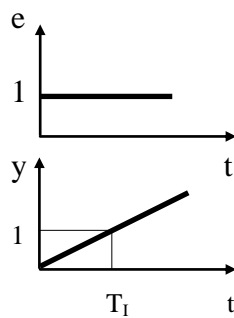
Regulacijski algoritem in prenosna funkcija:

$$y(t) = K_I \int e(t) dt; \quad \frac{dy(t)}{dt} = K_I e(t) = \frac{1}{T_I} e(t); \quad G_R = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} = -\frac{1}{sT_I}; \quad T_I = RC; \quad K_I = \frac{1}{T_I}$$

Elektronsko vezje:



Odziv na stopnico



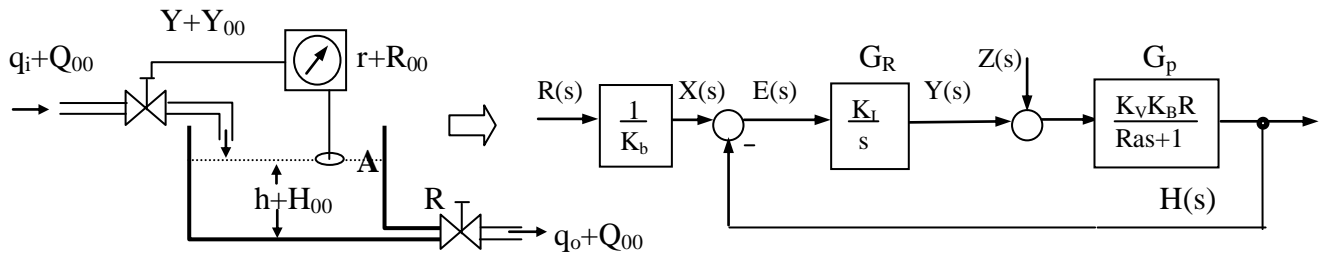
Značilne lastnosti:

- delovanje regulatorja je počasnejše in v določenih primerih lahko odpravi stacionarni pogrešek e_s
- regulirno veličino lahko proizvaja, tudi če je pogrešek enak nič (pretekle vrednosti pogreška so napolnile integrator)
- pogrešek med referenčno in regulirano veličino, ki povzroči maksimalno možno hitrost regulirne veličine, imenujemo proporcionalno hitrostno območje PVB (proportional velocity band)
- PVB skupaj z maksimalno hitrostjo določa strmino statične karakteristike oz. ojačenje regulatorja K_I .

$$K_I = \frac{\dot{y}}{e} = \frac{\dot{y}_{\max}}{PVB}; \quad \dot{y}_{\max} = \frac{y_{\max}}{T_y}; \quad K_I = \frac{y_{\max}}{T_y \cdot PVB}; \quad y(t) = \frac{y_{\max}}{T_y \cdot PVB} \int e(t) dt$$

Primer:

integrirna regulacija nivoja hidravličnega proporcionalnega sistema 1. reda:



K_V – konstanta ventila; povezava med regulirnim signalom (mA) in vhodnim pretokom

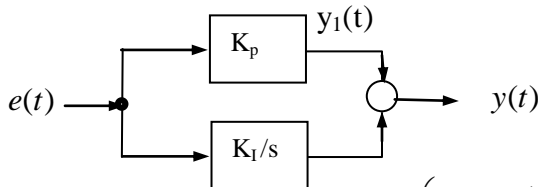
K_B – konstanta merilnega sistema; zveza med regulirano veličino v (m) in (mA)

Pri stopničasti referenci $X(s)=1/s$ je pogrešek v ustaljenem stanju enak nič:

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + G_R G_P} = \frac{RAs^2 + s}{RAs^2 + s + K_I K_V R K_B}; \quad e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(RAs^2 + s)}{RAs^2 + s + K_I K_V R K_B} \frac{1}{s} = 0$$

Proporcionalno – integrirni regulator – PI regulator

P del regulatorja trenutno učinkuje na pogrešek, vendar ne odpravlja pogreška v ustaljenem stanju, I del regulatorja zaradi končne hitrosti učinkuje počasneje, vendar odpravi pogrešek v ustaljenem stanju. PI regulator realiziramo s paralelno kombinacijo P in I regulatorja:



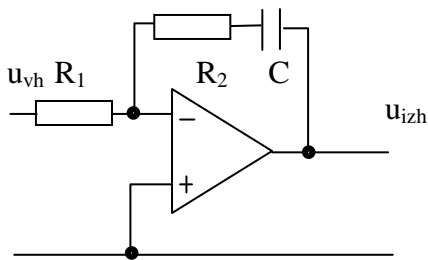
$$y(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right); \quad G_R = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_I} \right) = K_p \frac{1 + sT_I}{sT_I}$$

$$e(t) = 1 \Rightarrow y(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I} t \right)$$

$$K_p = \frac{y_p}{e}; \quad K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{K_p}{T_N}$$

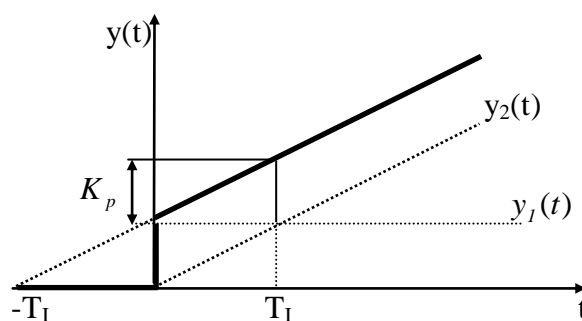
K_p – ojačenje regulatorja (proporcionalnostni faktor); T_I – integrirni čas; T_N – nastavitveni čas

Elektronsko vezje:



$$K_R = R_2 / R_1 \quad T_I = R_2 \cdot C$$

Odziv na stopnico: $e(t) = 1$



Značilne lastnosti:

- v času T_I regulirna veličina podvoji začetno vrednost, ki je določena z ojačenjem K_p
- T_I ... **prenastavitveni čas (reset time);**
- $1/T_I$... **prenastavitvena frekvenca (reset rate)**, ki pove s koliko je treba pomnožiti del regulirne veličine, ki pripada P delu regulatorja, da dobimo vrednost regulirne veličine po 1 časovni enoti
- **integralski pobeg**; pri vseh izvedbah regulatorjev, kjer v paralelni vezavi nastopa integrator, lahko pride do integralskega pobega (v primeru velikih sprememb na vходу, lahko izhod iz integratorja pobegne v področje nasičenja)

Regulatorji z diferencirnim dodatkom – PD regulatorji

PD regulacijski algoritem:

P regulatorju dodamo člen, katerega velikost je proporcionalna odvodu pogoška:

$$y(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_p e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt}; \quad G_R = K_p (1 + T_D s)$$

$$K_p = \frac{y - y_p}{e}; \quad K_D = K_p T_V$$

K_p – ojačenje regulatorja, T_D - diferencirni čas;

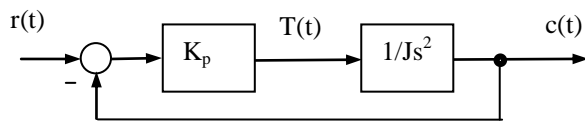
K_D – diferencialni faktor; T_V – diferencialna časovna konstanta

Primer - PD regulacija zasuka rotacijskega mehanskega sistema brez dušenja

Rotacijski mehanski sistem z zanemarljivim dušenjem lahko opišemo z naslednjo diferencialno enačbo:

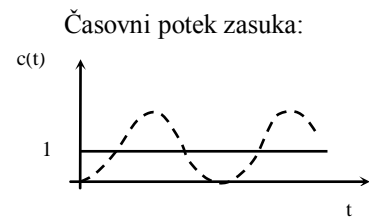
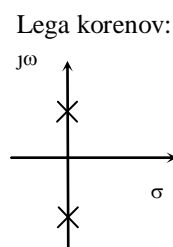
$$J \frac{d^2 c(t)}{dt^2} = T(t) \quad \begin{array}{l} c(t) \dots \text{zasuk sistema} \\ T(t) \dots \text{vzbujalni moment} \\ J \dots \dots \text{vztrajnostni moment bremena} \end{array}$$

Blokovna regulacijska shema regulacije zasuka z uporabo P regulatorja:

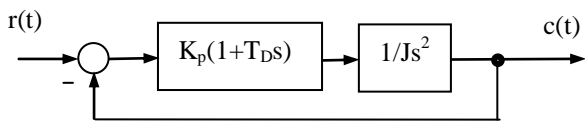


$$\text{PF: } \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{Js^2 + K_p}$$

$$\text{KE: } Js^2 + K_p = 0$$

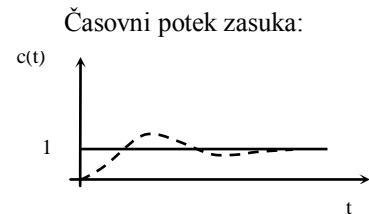
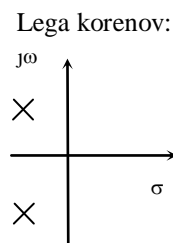


Če dodamo P regulatorju diferencirni del, so razmere s PD regulatorjem naslednje:



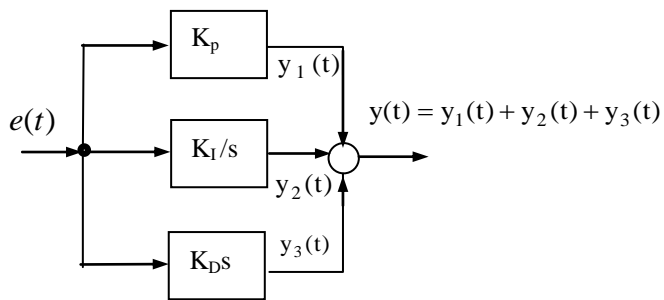
$$\text{PF: } \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p (1 + T_D s)}{Js^2 + K_p T_D s + K_p}$$

$$\text{KE: } Js^2 + K_p T_D s + K_p = 0$$



Zaradi D člena regulatorja se v karakteristični enačbi pojavi dušenje (člen $K_p T_D s$ v karakteristični enačbi). Lega korenov se je premaknila v levo polravnino, odziv sistema postane stabilnejši in dušen.

PID regulacijski algoritem



K_p - ojačenje regulatorja;

T_D - diferencirni čas;

T_I - integrirni čas;

T' - realni diferencirni čas

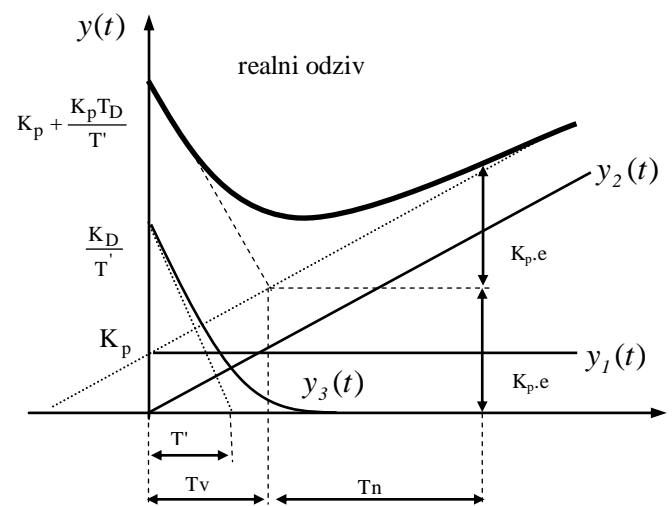
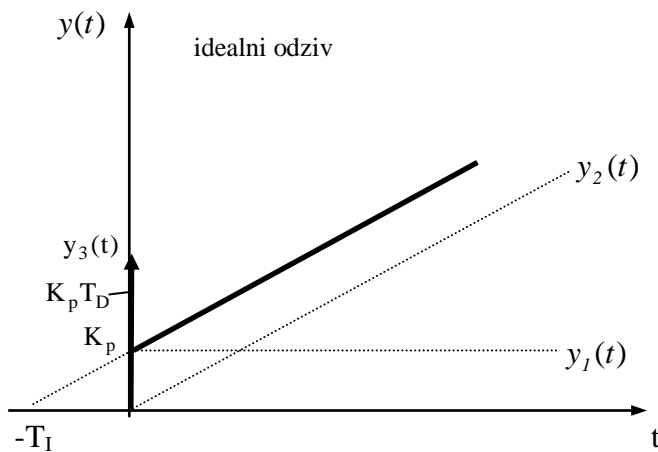
PI regulatorju dodamo člen, katerega velikost je proporcionalna odvodu pogreška:

$$y(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right); \quad G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

$$T_I = \frac{K_p}{K_I}; \quad T_D = \frac{K_D}{K_p}; \quad T' \approx (0.1 - 0.3) T_D$$

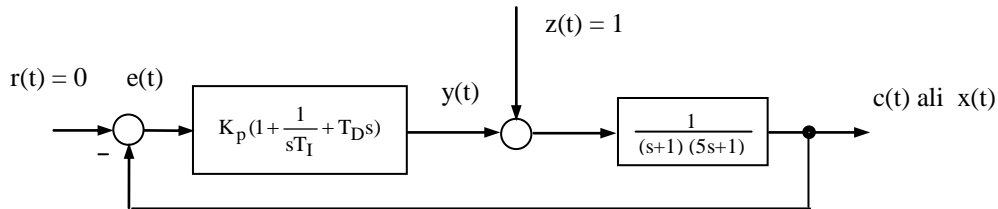
$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T' s + 1} \right); \quad P = K_p; \quad I = \frac{K_p}{T_I P}; \quad D = \frac{K_p T_D P}{T' P + 1}$$

$$K_p = \frac{y_p}{e}, \quad K_I = \frac{K_p}{T_N}; \quad K_D = T_V$$



Primer - PID regulacija sistema 2. reda

Spodnji primer kaže regulacijsko blokovno shemo 2. reda pri stopničasti motnji na regulirnem signalu in pri naslednjih parametrih regulatorja: $K_p = 19$, $T_I = 2$, $T_D = 4/19$



Ker velja $e(t) = -c(t)$, ima P regulator pogrešek v ustaljenem stanju. Z D členom povečamo dušenje, odziv je manj nihajoč, z I členom pa odpravimo pogrešek v ustaljenem stanju. Tako v praksi nastavljamo PID regulatorje.

Odziv regulacijskega sistema pri P, PD in PID regulatorju:

Nastavitvena pravila regulatorjev

Pri nastavljanju regulatorjev uporabljamo pokazatelje kvalitete regulacije: čas vzpona, maksimalni prevzpon in umiritveni čas in hitrost izreguliranja motenj.

1. Metoda Ziegler – Nichols

a) metoda Ziegler – Nichols s pomočjo odziva na stopnico

Regulator	K_p	T_I ali T_n	T_D ali T_v
$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K e^{-T_m s}}{T's + 1}$			
P	$\frac{1}{K} \frac{T'}{T_m'}$	∞	0
PI	$\frac{0.9}{K} \frac{T'}{T_m'}$	$3.3 T_m'$	0
PID	$\frac{1.2}{K} \frac{T'}{T_m'}$	$2 T_m'$	$0.5 T_m'$

Prenosna funkcija PID regulatorja:

$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) =$$

$$= \frac{1.2}{K} \frac{T'}{T_m'} \left(1 + \frac{1}{2 T_m' s} + 0.5 T_m' s \right) = \frac{0.6}{K} T' \frac{\left(s + \frac{1}{T_m'} \right)^2}{s};$$

PID regulator ima pol v koordinatnem izhodišču in dvojno ničlo pri $s = -1 / T_m'$.

b) metoda Ziegler – Nichols s pomočjo nihajnega preizkusa

Regulator	K_p	T_I ali T_n	T_D ali T_v
P	$0.5 K_{kr}$	∞	0
PD	$0.8 K_{kr}$	--	$0.125 T_{kr}$
PI	$0.45 K_{kr}$	$0.83 T_{kr}$	0
PID	$0.6 K_{kr}$	$0.5 T_{kr}$	$0.125 T_{kr}$

$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) =$$

$$= 0.6 K_{kr} \left(1 + \frac{1}{0.5 T_{kr} s} + 0.125 T_{kr} s \right) = 0.075 K_{kr} T_{kr} \frac{\left(s + \frac{4}{T_{kr}} \right)^2}{s}$$

PID regulator ima en pol v koordinatnem izhodišču in dvojno ničlo pri $s = -4 / T_{kr}$.

2. Metoda Chien – Hrones – Reswick

Regulator	Značilni parametri	Aperiodični odziv z najkrajšim umiritvenim časom		Najkrajši umiritveni čas z 20% prevzponom	
		motnja	referenca	motnja	referenca
P	K_p	$\frac{0.3 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.3 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.7 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.7 T_m'}{K T_m'}$
PI	K_p	$\frac{0.6 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.35 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.7 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.7 T_m'}{K T_m'}$
	T_I	$4 T_m'$	$1.2 T_m'$	$2.3 T_m'$	T_m'
PID	K_p	$\frac{0.95 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.6 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{1.3 T_m'}{K T_m'}$	$\frac{0.95 T_m'}{K T_m'}$
	T_I	$2.4 T_m'$	T_m'	$2 T_m'$	$1.35 T_m'$
	T_D	$0.42 T_m'$	$0.5 T_m'$	$0.42 T_m'$	$0.47 T_m'$

Izbira ustreznega regulatorja za določeno progo

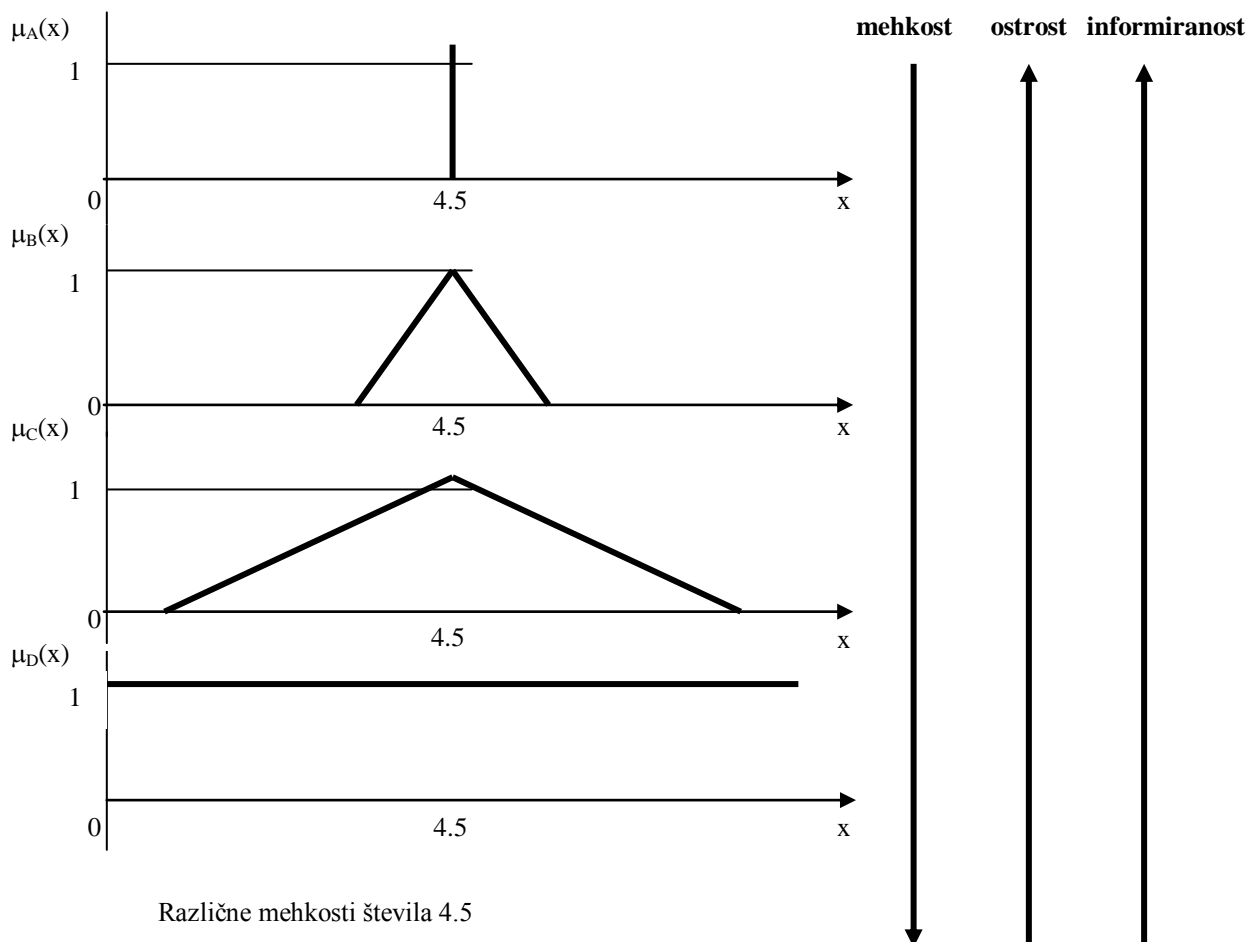
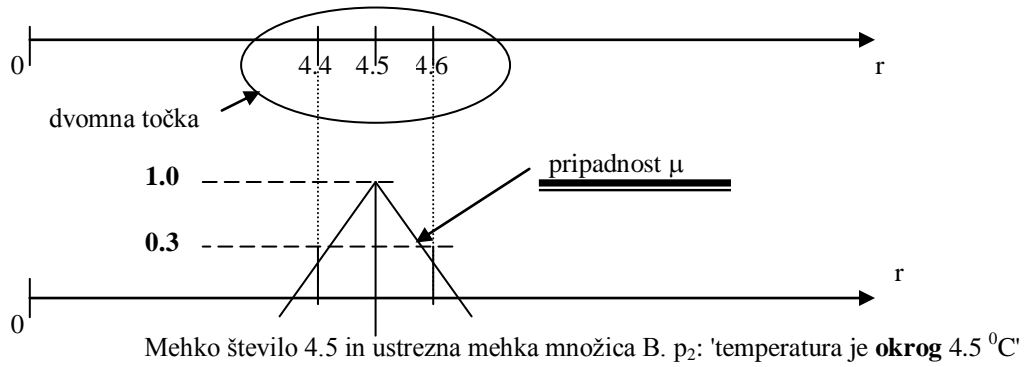
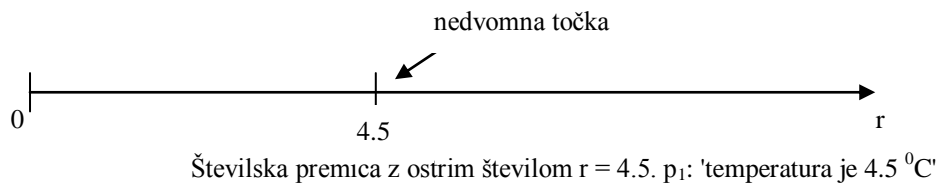
Proga	Regulator			
	P	PI	PD	PID
Sistem s čistim mrtvim časom	neuporabno	referenca + motnja	neuporabno	neuporabno
Sistem 1. reda z mrtvim časom	neuporabno	slabše kot PID	neuporabno	referenca + motnja
Sistem 2. reda z mrtvim časom	neustrezno	slabše kot PID	slabo	referenca + motnja
Sistem 1. reda z majhnim T_m	referenca + motnja	motnje	referenca pri T_m'	motnje pri T_m'
Sistem višjega reda	neustrezno	slabše kot PID	neustrezno	referenca + motnja
Sistem brez izenačenja in T_m'	referenca	motnje (brez T_m')	referenca	motnja

Primernost regulatorjev za dani sistem

Proga	Regulator					
	P	I	PI	PD	PID	ON-OFF
P_0	-	x	xx	-	-	-
$P-T_1$	x	x	x	-	-	x
$P-T_2$	-	-	x	-	xx	x
$P-T_T$	-	x	xx	-	-	-
$P-T_T-T_1 / \tau \gg T_T$	x	-	xx	x	x	x
$/ \tau > T_T$	-	-	x	-	x	-
I_0	x	-	x	-	-	x
$I-T_1$	-	-	x	x	xx	x
$I-T_T$	-	-	-	x	x	-

xx: zelo primeren
 x : primeren
 - : neprimeren

MEHKO VODENJE – FUZZY LOGIKA



OSNOVNI POJMI FUZZY LOGIKE

Fuzzy sets – fuzzy skupine z mehкими prehodi

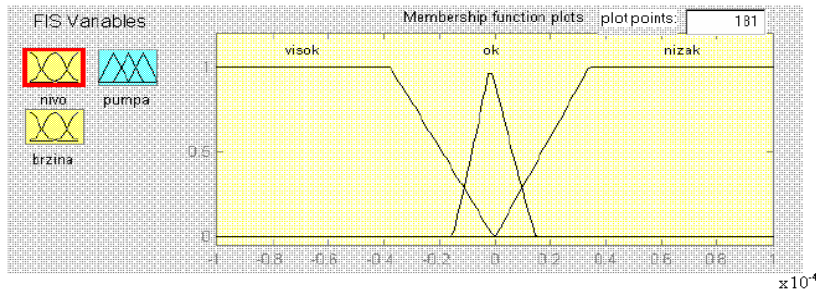
Linguistic variables – spremenljivke

Possibility distributions – porazdelitev možnosti

Fuzzy if-then rules – fuzzy pravila

Membership functions – funkcije pripadnosti (μ): trikotnik, trapez, sinus

Primer spremenljivk črpališča: *nivo*, *hitrost*, *črpalika*

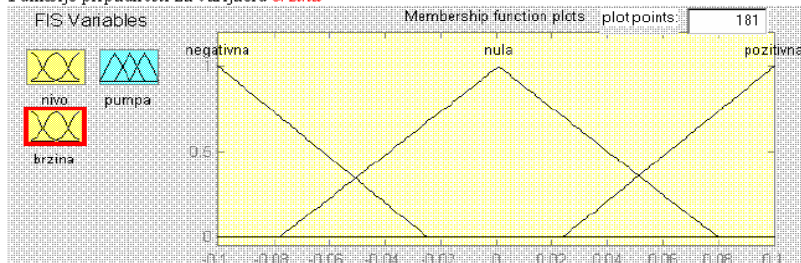


Vrednosti spremenljivk

nivo

- visok
- ok
- nizek

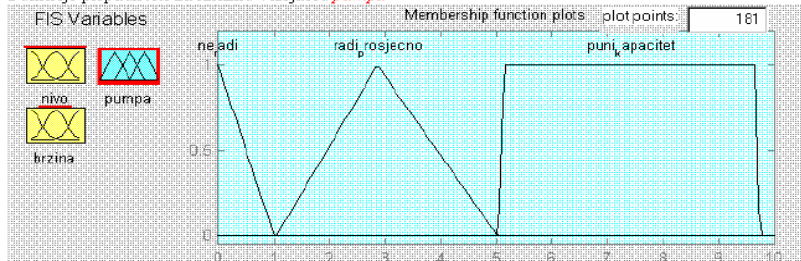
Funkcije pripadnosti za variablu *brzina*



hitrost

- negativna
- nič
- pozitivna

Funkcije pripadnosti za izlazno variablu *pumpa*



črpalika

- ne dela
- povprečno delovanje
- polna kapaciteta

Pravila fuzzy regulatorja:

1. **if** (*nivo* visok) **then** (*črpalika* ne dela)
2. **if** (*nivo* nizek) **then** (*črpalika* polna kapaciteta)
3. **if** (*nivo* ok) **and** (*hitrost* negativna) **then** (*črpalika* povprečno delovanje)
4. **if** (*nivo* ok) **and** (*hitrost* nič) **then** (*črpalika* ne dela)
5. **if** (*nivo* ok) **and** (*hitrost* pozitivna) **then** (*črpalika* ne dela)

Transformacija:

1. **if** (*nivo* visok) **or** ((*nivo* ok) **and** (*hitrost* nič) **or** (*hitrost* pozitivna)) **then** (*črpalika* ne dela)
2. **if** (*nivo* nizek) **then** (*črpalika* polna kapaciteta)
3. **if** (*nivo* ok) **and** (*hitrost* negativna) **then** (*črpalika* povprečno delovanje)

Spremenljivka *hitrost* pove, ali nivo raste ali pada: odvod $d(\textit{nivo})/dt$

POTEK SNOVANJA MEHKEGA REGULATORJA

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. postopek MEHČANJA ali FUZIFIKACIJE vhodnih spremenljivk | (matcing) |
| 2. postopek INFERENCE ali PROCESA ODLOČANJA | (inference) |
| 3. postopek KOMBINACIJE | (combination) |
| 4. postopek OSTRENJA ali DEFUZIFIKACIJE | (defuzzifaction) |

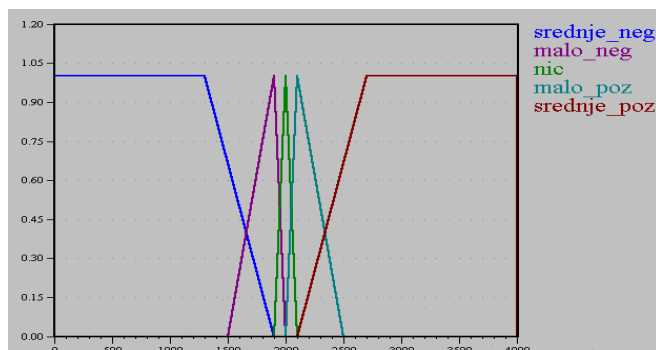
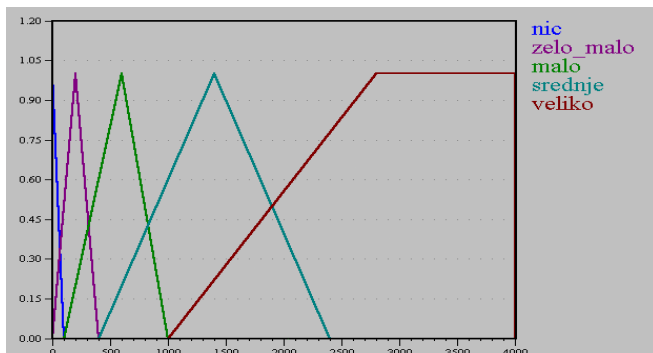
1. MEHČANJE ali FUZIFIKACIJA

- določanje množice vhodnih in izhodnih spremenljivk,
- določanje področja obravnave vhodnih in izhodnih spremenljivk,
- postopek mehčanja vhodnih spremenljivk.

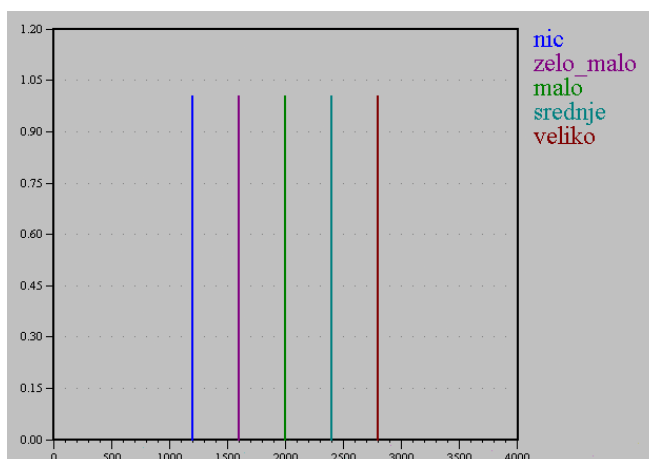
- VHOD: razlika nivojev "e ":
- VHOD: hitrost spreminjanja nivoja "de ":
- IZHOD: izhod iz izvršilnega člana "y ":

PRIPADNOSTNA FUNKCIJA RAZLIKE NIVOJEV E :

PRIP. FUNKC. HITROSTI SPREMINJANJA NIVOJA DE:



PRIPADNOSTNA FUNKCIJA IZHODA IZ REGULATORJA "Y " : (PRIMER OSTRIH IZHODOV)



3. INFERENCA ali PROCES ODLOČANJA

4.

- sestava množice *pravil krmiljenja* in
- *inferenca*

PRAVILA KRMILJENJA

IZHOD (Y)

VHOD (DE): hitrost spreminjanja nivoja

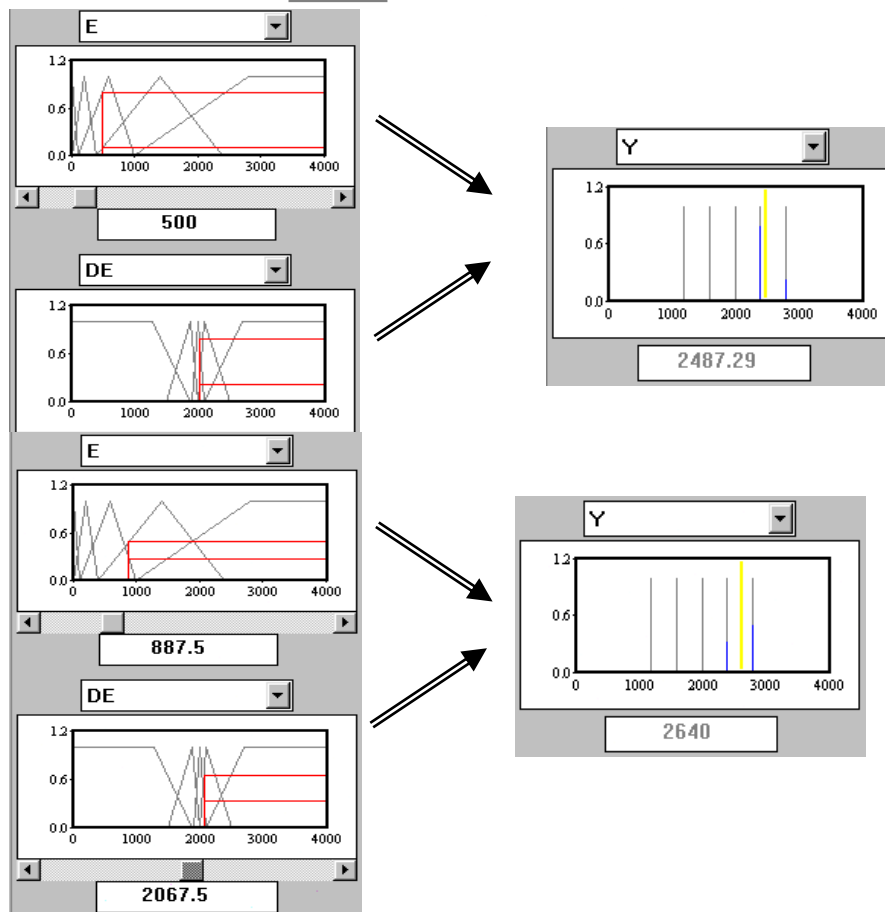
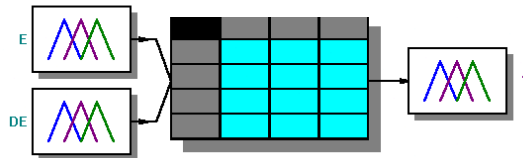
VHOD (E)
razlika
nivojev

Matrix	DE				
	SN	MN	N	MP	SP
N	N	ZM	M	V	V
ZM	N	M	M	V	V
M	N	M	S	V	V
S	ZM	M	S	V	V
V	M	M	S	V	V

nic
zelo_malo
malo
srednje
veliko

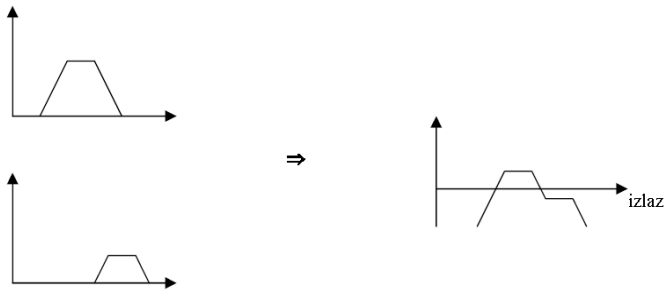
INFERENCA

max-min operator ali max-produkt operator



3. KOMBINIRANJE

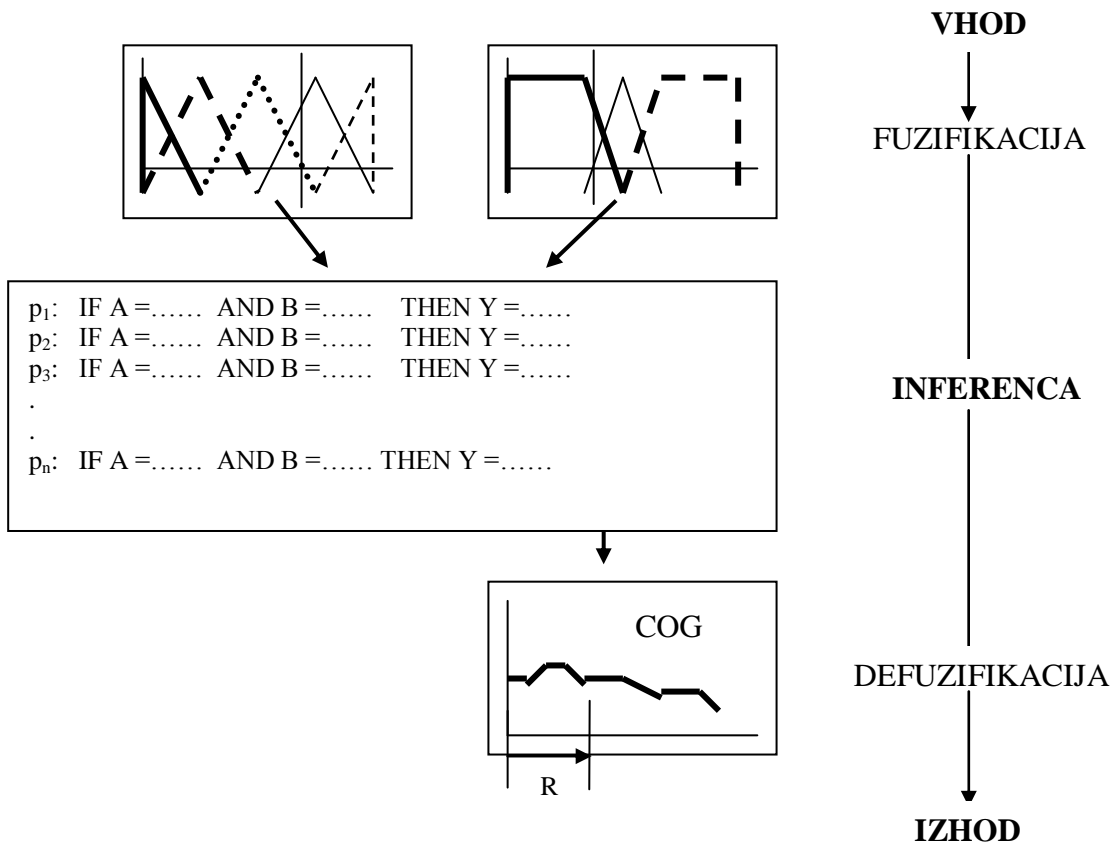
Postopek skombinira vse informacije, dobljene preko fuzzy pravil, v eno



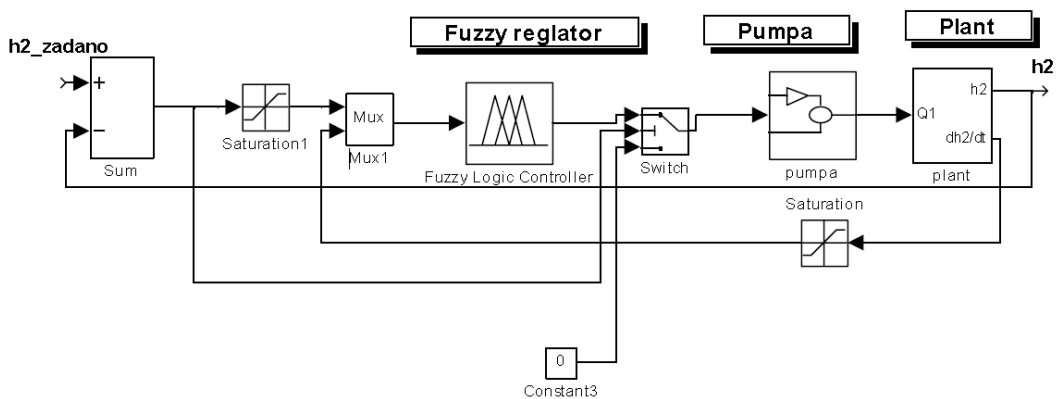
4. OSTRENJE ali DEFUZIFIKACIJA

- *težiščna metoda* (COG center-of-gravity),
- metoda središčnih vsot,
- metoda maksimumov,
- metoda višine, metoda največje površine ...

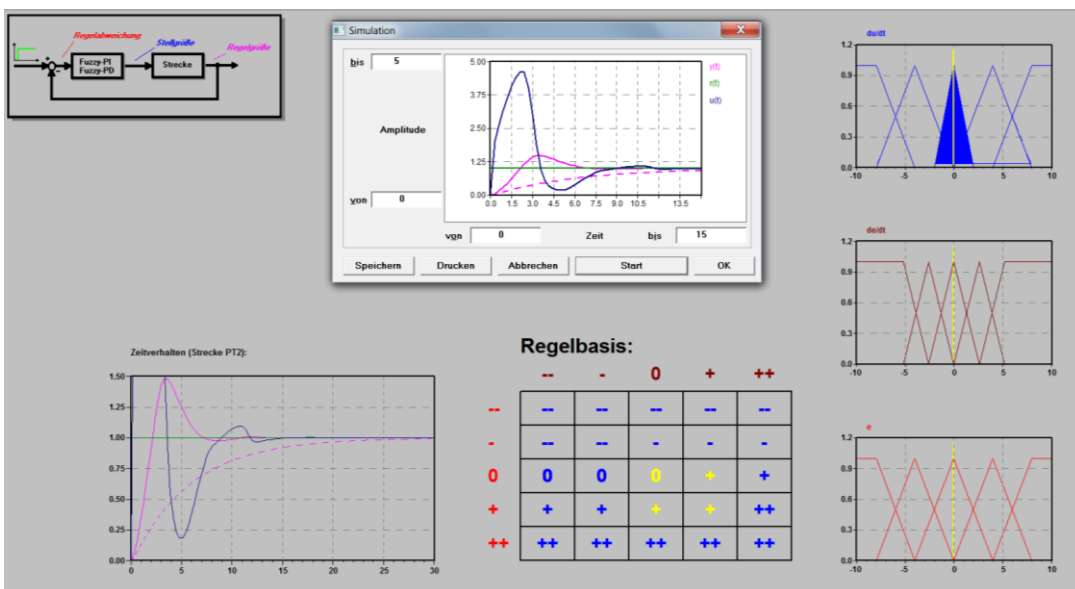
Snovanje mehkega regulatorja z dvema vhodoma, n pravili in enim izhodom:



Simulacija sistema s fuzzy regulatorjem črpališča z dvema posodama



Primer Winfact Fuzzy PI



Primer Winfact Fuzzy PD

