Projektovanje i implementacija ISAU

Žarko Zečević
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore

Predavanje 5

Adaptivni fazi PID regulator

Ishodi učenja:

Nakon savladavanja gradiva sa ovog predavanja studenti će moći da:

- Dizajniraju adaptivni fazi PID regulator
- Izvedu analitičke izraze za upravljački zakon fazi PID regulatora
- Implementiraju fazi PID regulator u Sumulink-u i izvrše poređenje sa konvencionalnim PID regulatorom

Fazi PID regulatori

Na prethodnom predavanju su obrađeni fazi PD regulatori. Pokazano je da ukoliko se na univerzumu greške i njenog izvoda definiše Q fazi skupova, a na univerzumu upravljačkog signala $2Q$-1 fazi skupova koji su simetrično raspoređeni, tada se fazi PD regulator ponaša kao klasični linearni PD regulator. Isto važi i za fazi PI i PID regulatore. Nelinearno ponašanje kontrolera može postići na više načina: promjenom oblika fazi skupova, narušavanjem simetrije između fazi skupova, promjenom metoda implikacije ili defazifikacije, itd.

Upravljački zakoni na prethodnom predavanju su bili definisani u pozicionoj formi, što znači da se kao izlaz iz fazi kontrolera direktno dobija upravljački signal $u(t)$. Na ovom predavanju će biti rađeni fazi PID regulatori u inkrementalnoj formi koji na svom izlazu daju promjenu upravljačkog signala u odnosu na njegovu vrijednost u prethodnoj iteraciji. Takođe, na univerzumu greške i njenog izvoda biće definisana samo dva fazi skupa, što kao rezultat daje regulatore sa drugačijim karakteristikama u odnosu na one sa prethodnog predavanja.

Klasični PD regulator

Da bi implementirali P(I)D kontroler na računaru, prvo je potrebno diskretizovati njegovu kontinualnu verziju. Diskretizacija se vrši pomoću bilinearne transformacije (ili neke druge metode) tako što se uvodi sljedeća smjena:

$$sK_d = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}K_d = \frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}K_d.$$

Upravljački signal će imati sljedeći oblik:

$$U(s) = (K_p + sK_d)E(s) \rightarrow U(z) = \left(K_p + \frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}K_d\right)E(z),$$

odnosno u vremenskom domenu važi:

$$u(nT) = -u(nT-T) + K_p\left(e(nT)+e(nT-T)\right) + \frac{2}{T}K_d\left(e(nT)-e(nT-T)\right)$$

$$= -u(nT-T) + K_p d(nT) + \frac{2}{T}K_d v(nT) = -u(nT-T) + T\underbrace{\left(K_p\frac{d(nT)}{T} + \frac{2}{T}K_d\frac{v(nT)}{T}\right)}_{\Delta u(nT)},$$

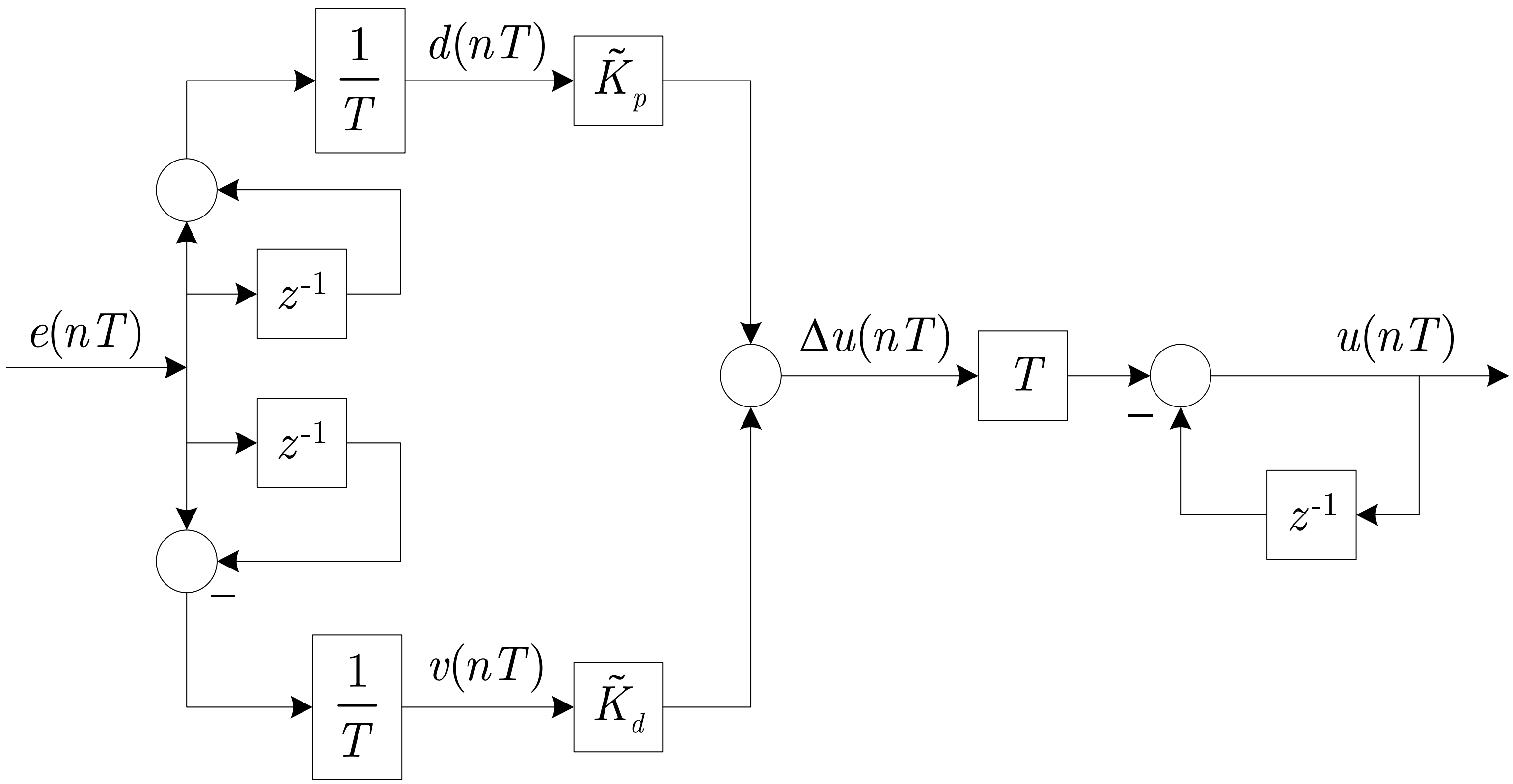
gdje su

$$d(nT) = e(nT) + e(nT-T), v(nT) = e(nT) - e(nT-T).$$

Klasični PD regulator

Realizacija PD kontrolera je prikazana na slici ispod. Obratiti pažnju na to da su uvedene sljedeće smjene:

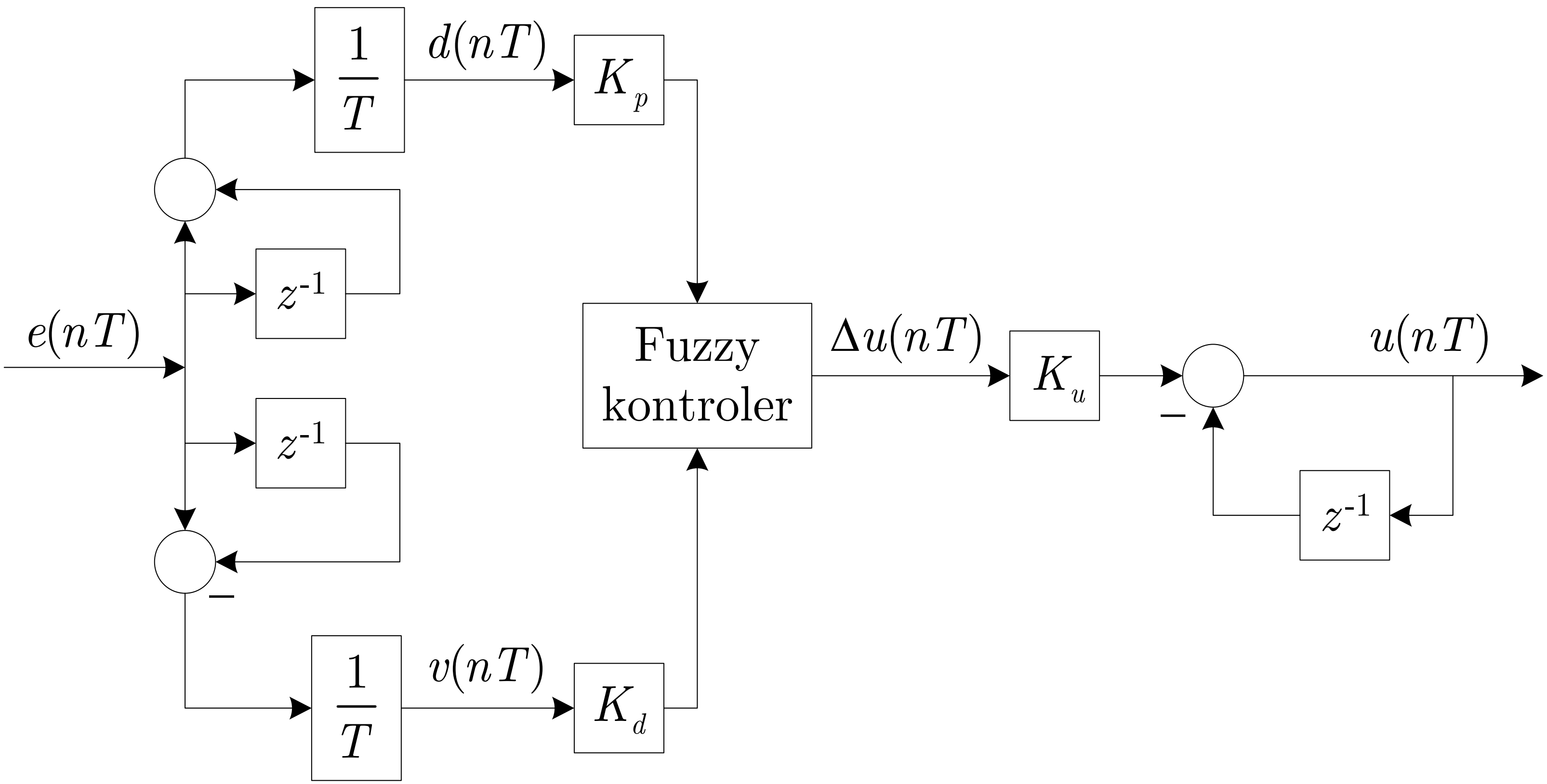
$$\tilde{K}_p = K_p, \tilde{K}_d = \frac{2}{T} K_d.$$



Fazi PD regulator

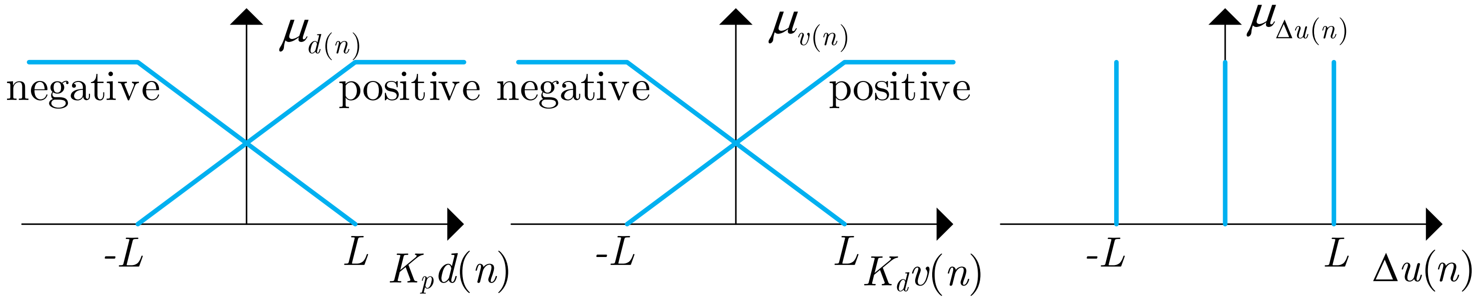
Fazi PD kontroler ima sličnu strukturu kao klasični PD kontroler. Razlika je u tome što:

- se sumator zamjenjuje fazi sistemom
- pojačanje T se zamjenjuje pojačanjem K_u (dodatni stepen slobode)



Dizajn fazi PD regulatora

- Dizajn fazi PD regulatora se sastoji iz tri faze: fazifikacije, kreiranja fazi baze pravila i defazifikacije.
- U procesu fazifikacije se koriste dva ulazna signala – „signal greške“ $d(nT)$ i brzina promjene signala greške $v(nT)$. Izlaz iz fazi PD regulatora je promjena upravljačkog signala $\Delta u(nT)$.
- Funkcije pripadnosti za ulazne i izlazni signal su prikazane na slici ispod



- Za ulazne signale se koriste dvije funkcije pripadnosti, dok se za izlazni signal koriste tri singleton funkcije pripadnosti. Parametar L predstavlja maksimalnu vrijednost upravljačkog signala koja se dostiže za $|K_p d(n)|>L$ i $|K_d v(n)|>L$.

Dizajn fazi PD regulatora

- Baza fazi pravila se definiše na sljedeći način:

$$R^{(1)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } P \text{ and } v(n) \text{ is } P \text{ then } \Delta u(n){=}Z$$

$$R^{(2)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } P \text{ and } v(n) \text{ is } N \text{ then } \Delta u(n){=}P$$

$$R^{(3)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } N \text{ and } v(n) \text{ is } P \text{ then } \Delta u(n){=}N$$

$$R^{(4)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } N \text{ and } v(n) \text{ is } N \text{ then } \Delta u(n){=}Z$$

- U gornjoj simboli P, N i Z označavaju pozitivne, negativne i nulte fazi skupove.
- Ukoliko je greška pozitivna i izvod od greške takođe pozitivan, to znači da je izlazni signal manji od referentnog, ali i da se izlaz smanjuje. Obratiti pažnju da je upravljački signal jednak:

$$u(nT) = -u(nT - T) + K_u \Delta u(nT)$$

Zbog znaka „minus“ upravljački signal će promijeniti smjer, pa će izlaz početi da se povećava, a inkrement $\Delta u(nT)$ treba postaviti na 0.

Dizajn fazi PD regulatora

- Ukoliko je greška pozitivna, a njen izvod negativan, to znači da je izlazni signal manji od $r(nT)$, ali da raste. Kako zakon upravljanja u svakoj iteraciji mijenja smjer:

$$u(nT) = -u(nT - T) + K_u \Delta u(nT),$$

  a ovom slučaju treba da ostane isti, $\Delta u(nT)$ treba da bude pozitivno kako bi se kompenzovala promjena znaka.
- Kad je greška negativna, a njen izvod pozitivan, to znači da je izlazni signal veći od $r(nT)$ i da opada. Upravljački signal tad treba da ostane na istu vrijednost. Stoga, da bi se kompenzovala promjena znaka u upravljačkom signalu, inkrement $\Delta u(nT)$ treba da bude negativan.
- Konačno, u četvrtom pravilu, kada su greške i izvod manji od 0, to znači da je izlaz veći od $r(nT)$ i da raste. Upravljački signal treba da promijeni znak, a inkrement treba postaviti na nulu.

Defazifikacija PD regulatora

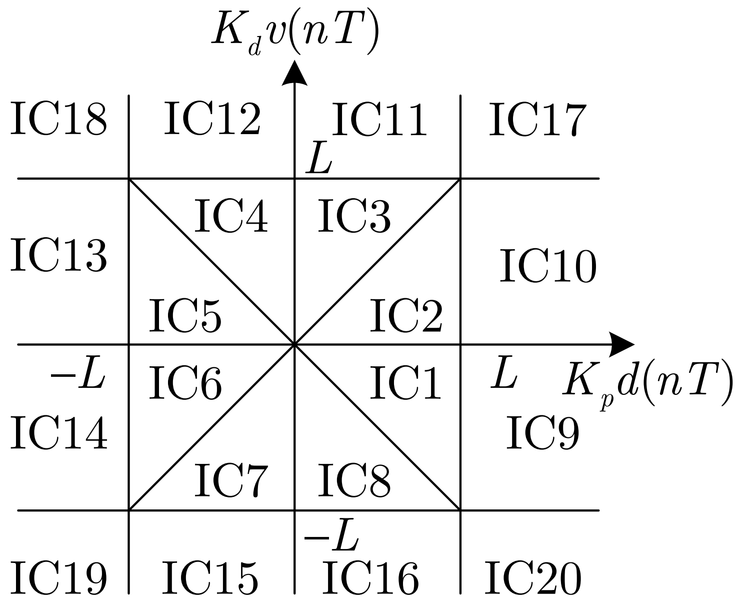
- Defazifikacija regulatora se vrši pomoću WT (weighted average) pravila:

$$\Delta u(nT) = \frac{\sum \text{stepen zadov. } i\text{-tog pravila} \times \text{odgovarajuća vrijednost izlaza}}{\sum \text{stepen zadovoljenja } i\text{-tog pravila}}.$$

- Treba napomenuti da se umjesto signala $d(n)$ kao prvi ulaz koristi $K_p d(nT)$, što predstavlja skaliranu vrijednost zbira grešaka iz dvije iteracije, dok je drugi ulaz $K_d v(nT)$, odnosno skalirana vrijednost brzine promjene greške. Ovo nema uticaja na samu tabelu pravila.
- Lako se može pokazati da se nakon primjene gornje formule na definisane funkcije pripadnosti, ravan $(K_p d(nT), K_d v(nT))$ dijeli na 20 regiona i da se za svaki region dobijaju analitički izrazi koji će biti dati u nastavku prezentacije.

Analitički izrazi za zakon upravljanja

Upravljački zakon zavisi od toga u kom regionu sa slike ispod se nalazi izmjerena vrijednost para $(K_p d(nT),\ K_d v(nT))$.



$$\Delta u(nT) = \frac{L(K_p d(nT) - K_d v(nT))}{2(2L - K_p \mid d(nT) \mid)},\ \text{za regione } IC_1,\ IC_2,\ IC_5,\ IC_6.$$

$$\Delta u(nT) = \frac{L(K_p d(nT) - K_d v(nT))}{2(2L - K_d \mid v(nT) \mid)},\ \text{za regione } IC_3,\ IC_4,\ IC_7,\ IC_8.$$

Analitički izrazi za zakon upravljanja

$$\Delta u(nT) = \frac{1}{2}(L - K_d v(nT)),\ \text{za regione IC}_9,\ \text{IC}_{10}.$$

$$\Delta u(nT) = \frac{1}{2}(-L + K_p d(nT)),\ \text{za regione IC}_{11},\ \text{IC}_{12}.$$

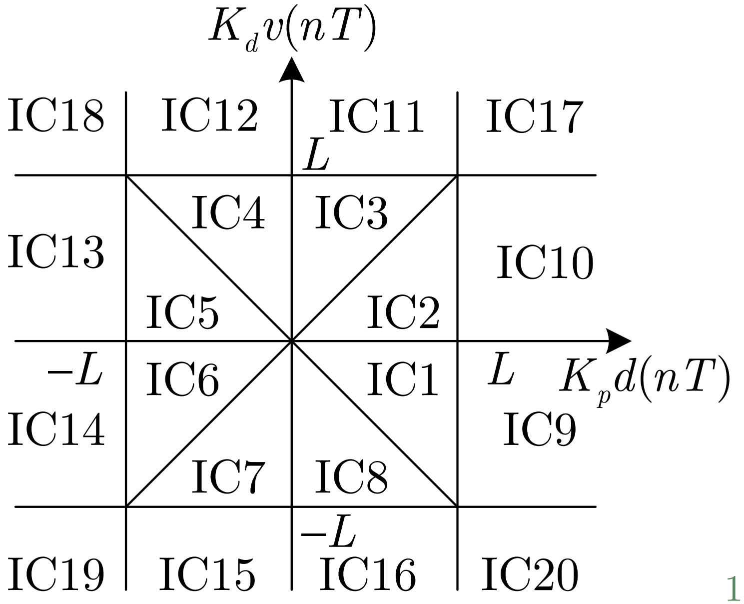
$$\Delta u(nT) = \frac{1}{2}(-L - K_d v(nT)),\ \text{za regione IC}_{13},\ \text{IC}_{14}.$$

$$\Delta u(nT) = \frac{1}{2}(L + K_p d(nT)),\ \text{za regione IC}_{15},\ \text{IC}_{16}.$$

$$\Delta u(nT) = 0,\ \text{za regione IC}_{17},\ \text{IC}_{19}.$$

$$\Delta u(nT) = -L,\ \text{za regione IC}_{18}.$$

$$\Delta u(nT) = L,\ \text{za regione IC}_{20}.$$



Analitički izrazi za zakon upravljanja

- Važno je uočiti da devet formula kojima je predstavljen PD regulator predstavljaju klasične („crisp“) analitičke izraze iz kojih nije vidljiv „fuzzy sadržaj“ (fazifikacija, defazifikacija, funkcije pripadnosti, if-then pravila, itd.).
- Ovo znači da se ovaj regulator ponaša kao konvencionalni PD regulator, bez obzira na termin „fuzzy“, i da inženjer ne mora da ima prethodno znanje o fuzzy logici da bi podesio njegove parametre.
- Podešavanje fuzzy PD regulatora se svodi na odabir pojačanja K_p, K_d, K_u i L, što predstavlja jedan stepen slobode više u odnosu na konvencionalni PD regulator.
- Formule PD regulatora su kontinualno povezane, što se može provjeriti uvrštavanjem graničnih uslova u svaku od formula. Ovo znači da neće biti naglih skokova u upravljačkom signalu.

Analitički izrazi za zakon upravljanja

Ako obratimo pažnju na prvi izraz

$$
\begin{aligned}
\Delta u(nT) &= \frac{L(K_p d(nT) - K_d v(nT))}{2(2L - K_p \mid d(nT) \mid)} \\
&= \frac{LK_p}{2(2L - K_p \mid d(nT) \mid)} d(nT) - \frac{LK_d}{2(2L - K_p \mid d(nT) \mid)} v(nT)
\end{aligned}
$$

uočavamo da se radi o linearnom PD zakonu upravljanja, kod kojeg su pojačanja koja množe signale $d(nT)$ i $v(nT)$ vremenski promjenljiva.

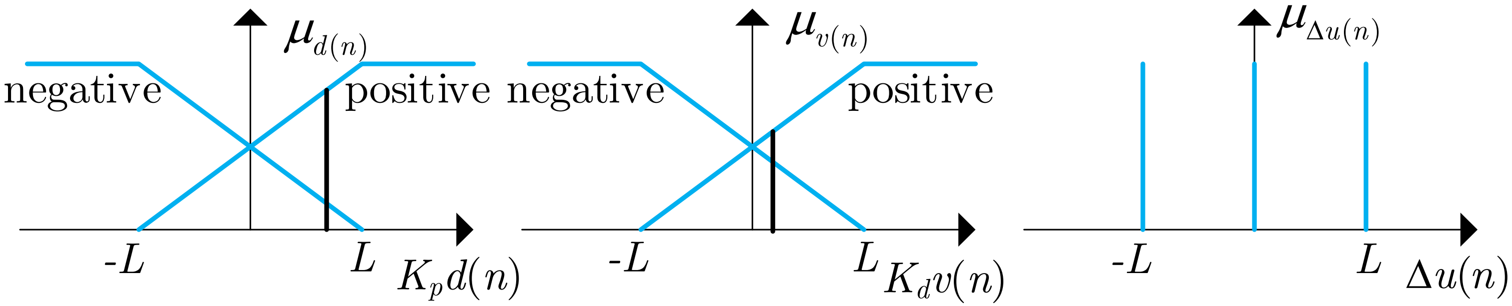
Upravo pomoću ovih promjenljivih pojačanja se postižu poboljšanja u performansama. Kada se greška poveća, povećaće se i vrijednost signala $d(nT)=e(nT)+e((n\text{-}1)T)$, pa će se samim tim povećati i vrijednosti koeficijenata koji množe signale $d(nT)$ i $v(nT)$, odnosno, povećaće se vrijednost upravljačkog signala.

Važno je napomenuti da kad $K|d(nT)|$ pređe vrijednost L, zakon upravljanja se svičuje na novi oblik (novi region).

Primjer 1 – Fuzzy PD regulator

Izvesti analitički izraz za inkrement upravljačkog zakona u regionu IC2.

U regionu IC2 signali $K_p d(n)$ i $K_d v(n)$ su pozitivni, pri čemu je $K_p d(n) > K_d v(n)$.



Prvo pravilo u bazi ima sljedeći oblik:

IF e=positive and v=positive THEN Δu=zero.

Stepen ispunjenosti ovog pravila je (gleda se manja vrijednost fje pripadnosti):

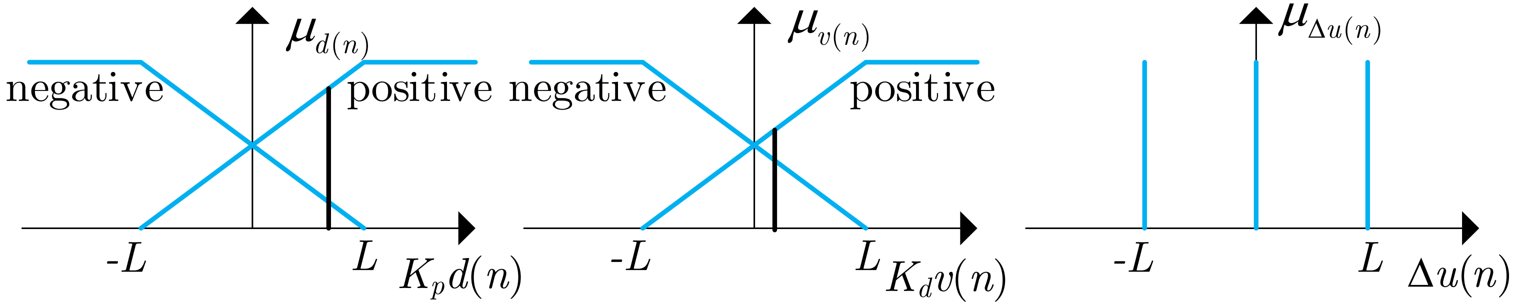
$$\mu_1 = \frac{1}{2L}\left(K_d v(n) + L\right)$$

Jednačina prave koje odgovara fazi skupu $v(n)$-positive

dok je inkrement upravljačkog signala jednak

$$\Delta u_1 = 0.$$

Primjer 1 – Fuzzy PD regulator



Na sličan način treba odrediti stepene ispunjenosti preostalih pravila i odgovarajuće vrijednosti inkremenata upravljačkog signala.

Drugo pravilo glasi:

IF e=positive and v=negative THEN Δu=L.

Stepen ispunjenosti ovog pravila je:

$$\mu_2 = -\frac{1}{2L}\left(K_d v(n) - L\right)$$

dok je inkrement upravljačkog signala jednak

$$\Delta u_2 = L.$$

Jednačina prave koje odgovara fazi skupu $v(n)$-negative

Primjer 1 – Fuzzy PD regulator

Za preostala dva pravila se dobija sljedeće:

$$\mu_3 = -\frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - L\right), \Delta u_3 = -L,$$
$$\mu_4 = -\frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - L\right), \Delta u_4 = 0.$$

Konačno, izlaz iz fazi sistema je jednak:

$$\Delta u = \frac{\mu_1 \Delta u_1 + \mu_2 \Delta u_2 + \mu_3 \Delta u_3 + \mu_4 \Delta u_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4}$$
$$= \frac{-\frac{1}{2L}\left(K_d v(n) - L\right)L + \frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - L\right)L}{\frac{1}{2L}\left(K_d v(n) + L\right) - \frac{1}{2L}\left(K_d v(n) - L\right) - \frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - L\right) - \frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - L\right)}$$
$$= \frac{\frac{1}{2L}\left(K_p d(n) - K_d v(n)\right)L}{\frac{1}{2L}\left(-2K_p d(n) + 4L\right)} = \frac{L\left(K_p d(n) - K_d v(n)\right)}{2\left(2L - K_p d(n)\right)}$$

Primjer 2 – Fuzzy PD regulator

Proces je opisan sljedećom funkcijom prenosa:

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)}.$$

Uporediti odzive konvencionalnog i fazi PD regulatora, za sljedeće parametre:

$$T = 0.1,\ \ K_d = 0.5, K_p = 0.5, K_u = 0.1,\ \ L{=}361.$$

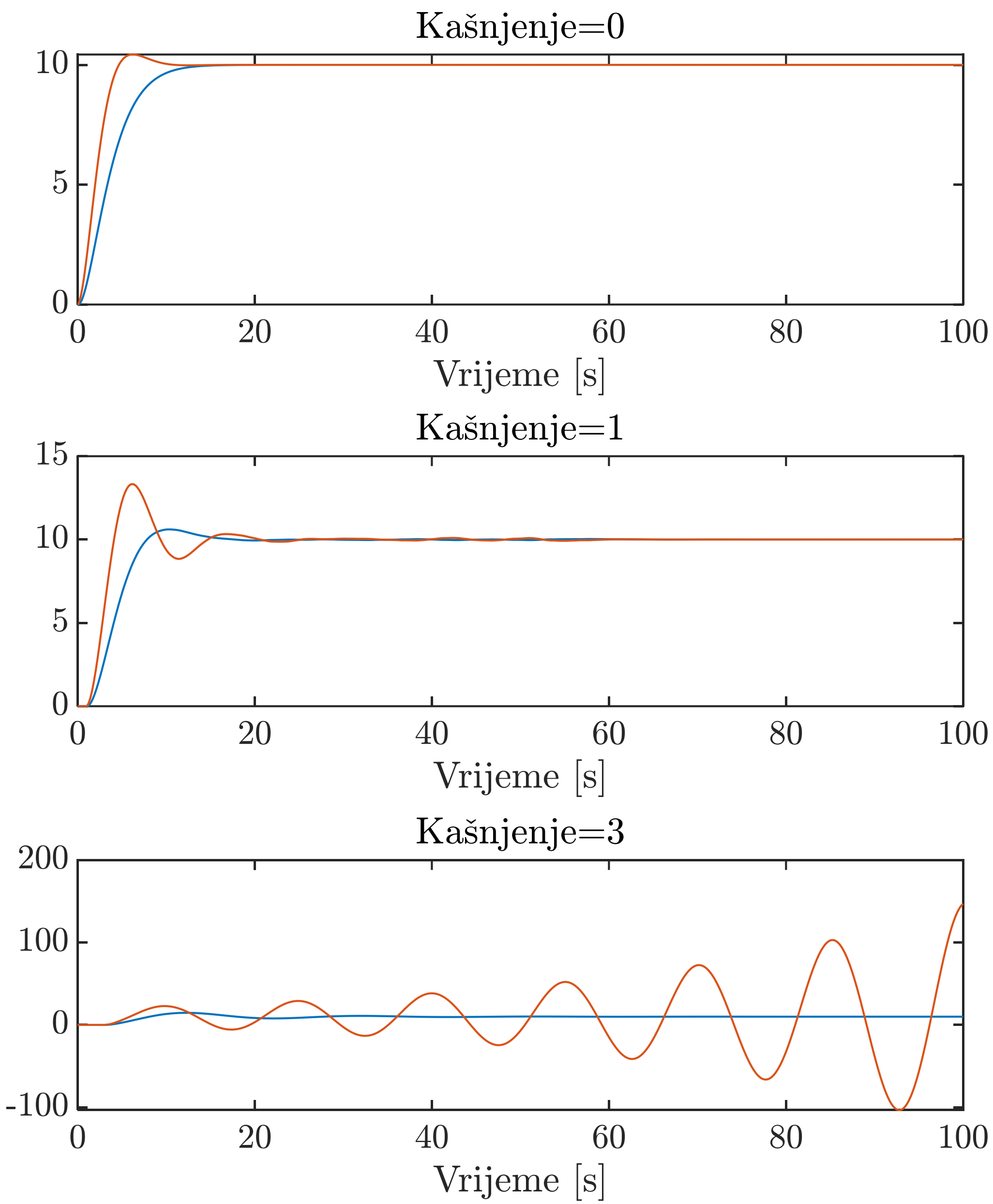
Referentni signal je step funkcija amplitude 10.

Ponoviti postupak za sljedeće funkcije prenosa:

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} e^{-s}$$

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} e^{-3s}.$$

Primjer 2 – Fuzzy PD regulator



Klasični PI regulator

Diskretizacija PI regulatora se takođe vrši pomoću bilinearne transformacije:

$$K_i \frac{1}{s} = \frac{K_i T}{2} \frac{z+1}{z-1} = \frac{K_i T}{2} \frac{2-(1-z^{-1})}{1-z^{-1}} = -\frac{K_i T}{2} + \frac{K_i T}{1-z^{-1}}.$$

Upravljački signal će imati sljedeći oblik:

$$U(s) = \left(K_p + K_i \frac{1}{s}\right) E(s) \to U(z) = \left(K_p - \frac{K_i T}{2} + \frac{K_i T}{1-z^{-1}}\right) E(z),$$

odnosno u vremenskom domenu:

$$u(nT) - u(nT-T) = \left(K_p - \frac{K_i T}{2}\right)\big(e(nT) - e(nT-T)\big) + K_i T e(nT).$$

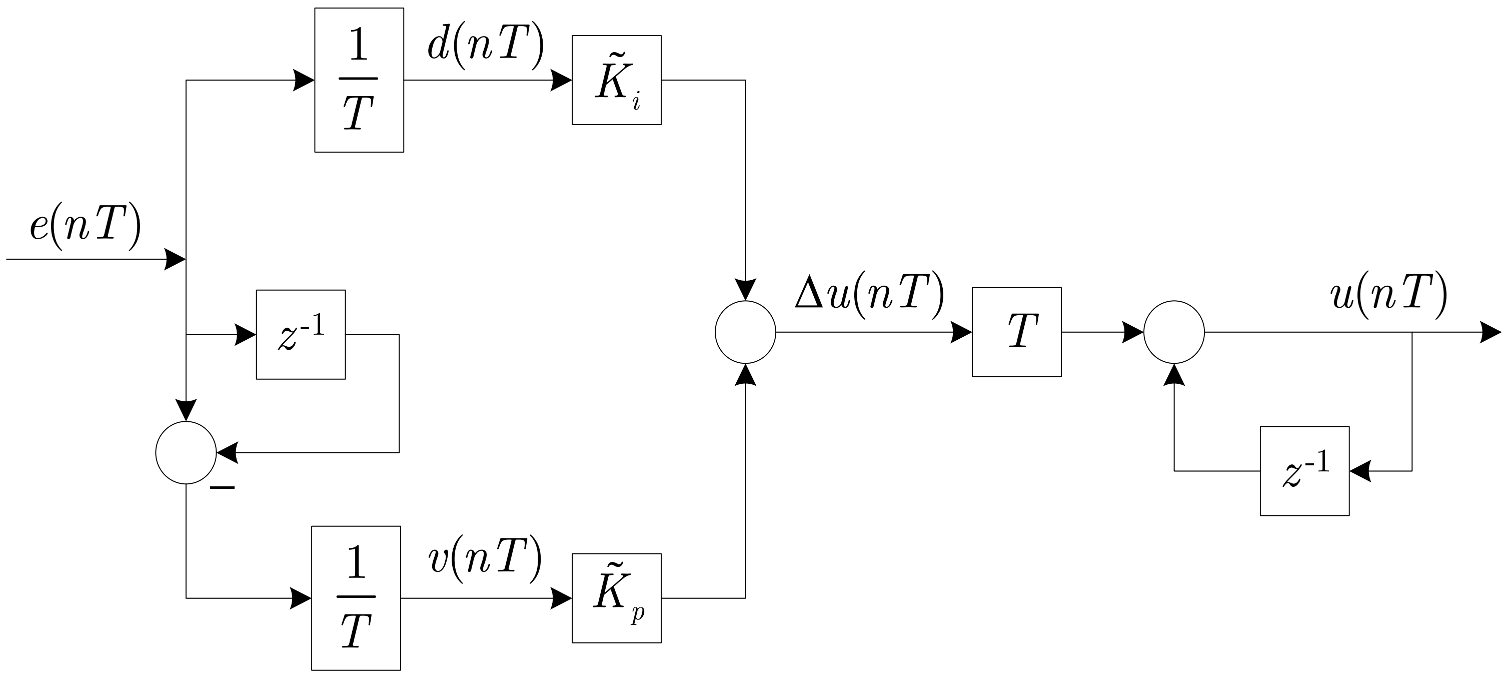
odakle se dalje dobija:

$$u(nT) = u(nT-T) + T \underbrace{\left(\tilde{K}_p \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T} + \tilde{K}_i \frac{e(nT)}{T}\right)}_{\Delta u(nT)},$$

gdje je $\tilde{K}_p = K_p - \frac{K_i T}{2}, \tilde{K}_i = K_i T.$

Klasični PI regulator

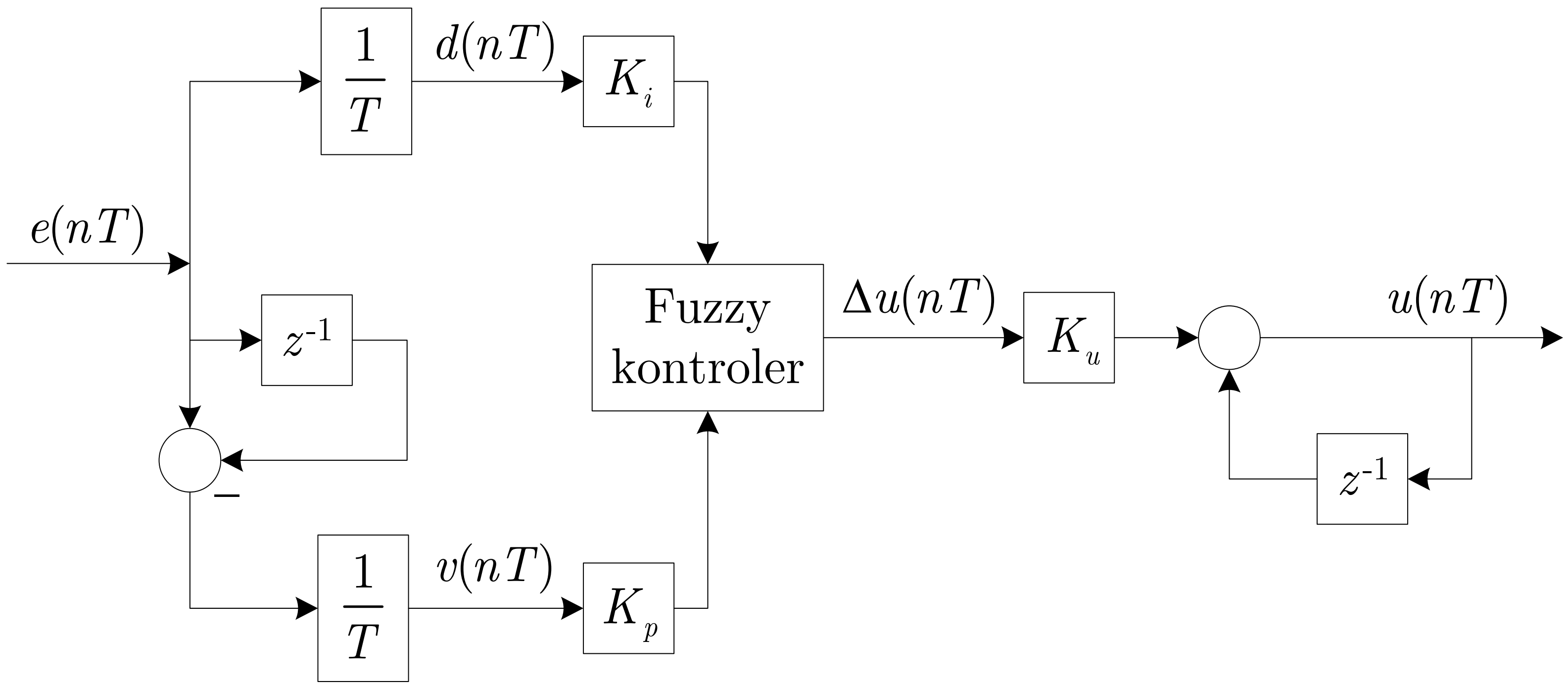
Realizacija PI kontrolera je prikazana na slici ispod.



Kod fazi PI regulatora u gornjoj šemi

- Sumator se zamjenjuje fazi sistemom
- Pojačanje T se zamjenjuje pojačanjem K_u (dodatni stepen slobode)

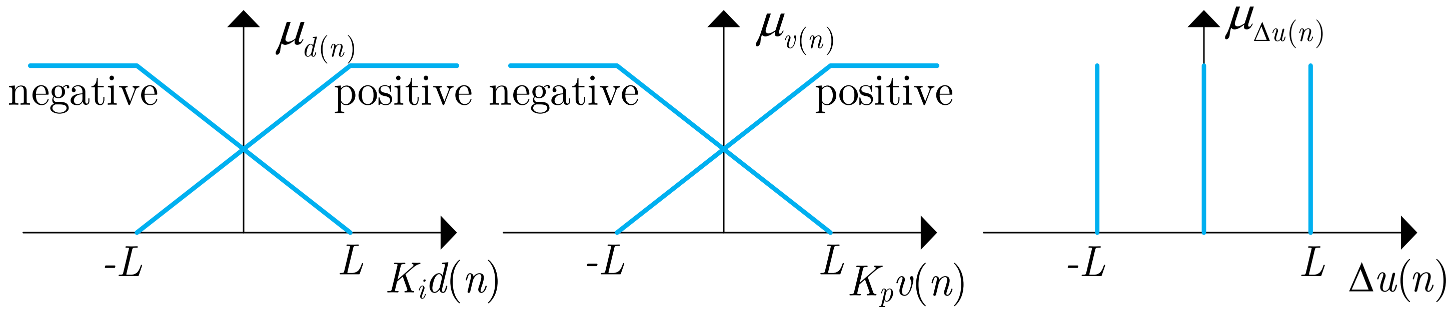
Fazi PI regulator



Ulaz u fazi kontroler predstavljaju signali $K_i d(nT)$, $K_p v(nT))$. Obratiti pažnju da se inkrement upravljačkog signala dodaje prethodnoj vrijednosti upravljanja, što utiče na definisanje baze fazi pravila. Na primjer, ako su greška i njen izvod pozitivni, to znači da upravljački signal treba povećati, odnosno da inkrement treba da bude pozitivan.

Fazi PI regulator

Funkcije pripadnosti i fazi baza pravila PI regulatora



Napomena: Kao izlazne funkcije se mogu koristiti singleton-i. Za vježbu uporediti obje vrste funkcija pripadnosti.

$R^{(1)}$ if $d(n)$ is P and $v(n)$ is P then $\Delta u(n) = P$

$R^{(2)}$ if $d(n)$ is P and $v(n)$ is N then $\Delta u(n) = Z$

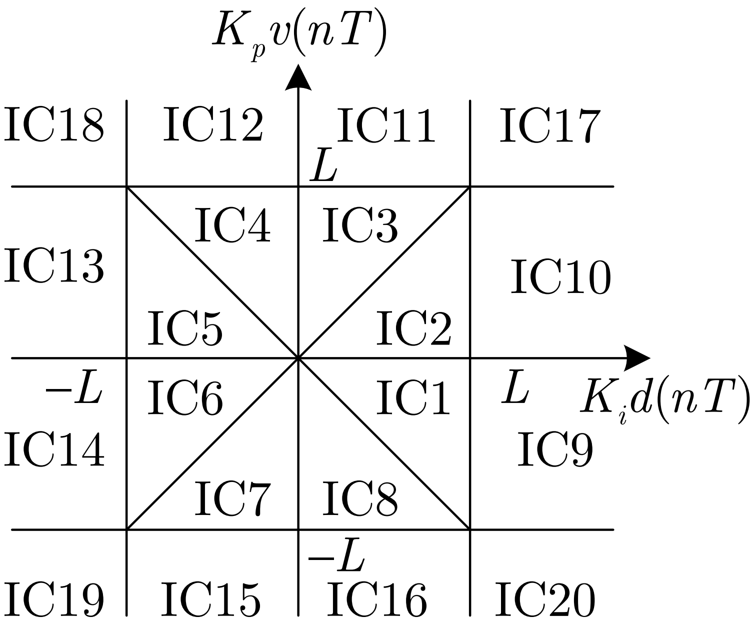
$R^{(3)}$ if $d(n)$ is N and $v(n)$ is P then $\Delta u(n) = Z$

$R^{(4)}$ if $d(n)$ is N and $v(n)$ is N then $\Delta u(n) = N$

Baza fazi pravila se razlikuje, jer se kod PI regulatora inkrement upravljačkog signala nema negativan predznak.

Fazi PI regulator

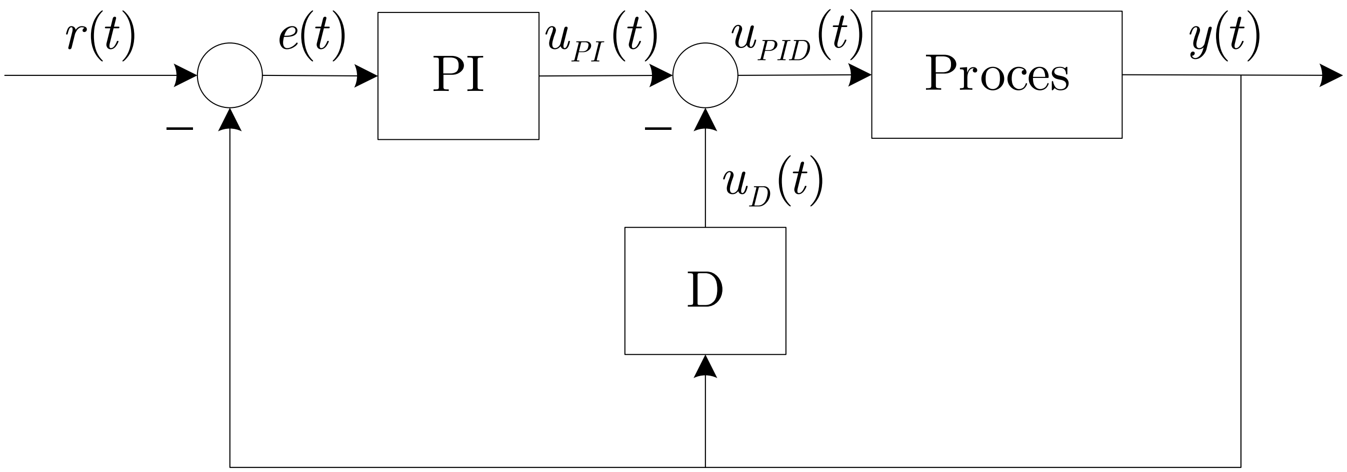
Jednačine i regioni fazi PI regulatora



$$
\begin{aligned}
\Delta u(nT) &= \frac{L\left(K_i d(nT) + K_p v(nT)\right)}{2\left(2L - K_i \, |\, d(nT)\,|\right)}, \text{ IC1, IC2, IC5, IC6} \\
&= \frac{L\left(K_i d(nT) + K_p v(nT)\right)}{2\left(2L - K_p \, |\, v(nT)\,|\right)}, \text{ IC3, IC4, IC7, IC8} \\
&= \frac{1}{2}\left(L + K_p v(nT)\right), \text{ IC9, IC10} \\
&= \frac{1}{2}\left(L + K_i d(nT)\right), \text{ IC11, IC12} \\
&= \frac{1}{2}\left(-L + K_p v(nT)\right), \text{ IC13, IC14} \\
&= \frac{1}{2}\left(-L + K_i d(nT)\right), \text{ IC15, IC16} \\
&= 0, \text{ IC18, IC20} \\
&= -L, \text{IC17} \\
&= L, \text{ IC19}
\end{aligned}
$$

PID regulator

Na slici ispod je prikazana struktura PI+D kontrolera. Ovakva realizacija se najčešće koristi u praksi iz razloga što se u referentnom signalu često javljaju nagli skokovi u vrijednostima (diferencijator je osjetljiv na nagle promjene).



Za PI+D regulator važe sljedeće jednačine:

$$u_{PID}(t) = u_{PI}(t) - u_D(t)$$

$$U_{PI}(s) = K_p E(s) + K_i \frac{1}{s} E(s)$$

$$U_D(s) = -K_d s Y(s)$$

PID regulator

Prethodne jednačine se diskretizuju na isti način kao PI i PD kontroleri

$$U_{PI}(z) = \left(\underbrace{K_p - \frac{K_i T}{2}}_{\tilde{K}_p} + \underbrace{K_i T}_{\tilde{K}_i} \frac{1}{1 - z^{-1}} \right) E(z) \rightarrow u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + T\Delta u_{PI}(nT),$$

$$\Delta u_{PI}(nT) = \tilde{K}_p \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} + \tilde{K}_i \frac{e(nT)}{T}.$$

$$U_D(z) = K_d \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} Y(z) \rightarrow u_D(nT) = u_D(nT - T) + T\Delta u_D(nT),$$

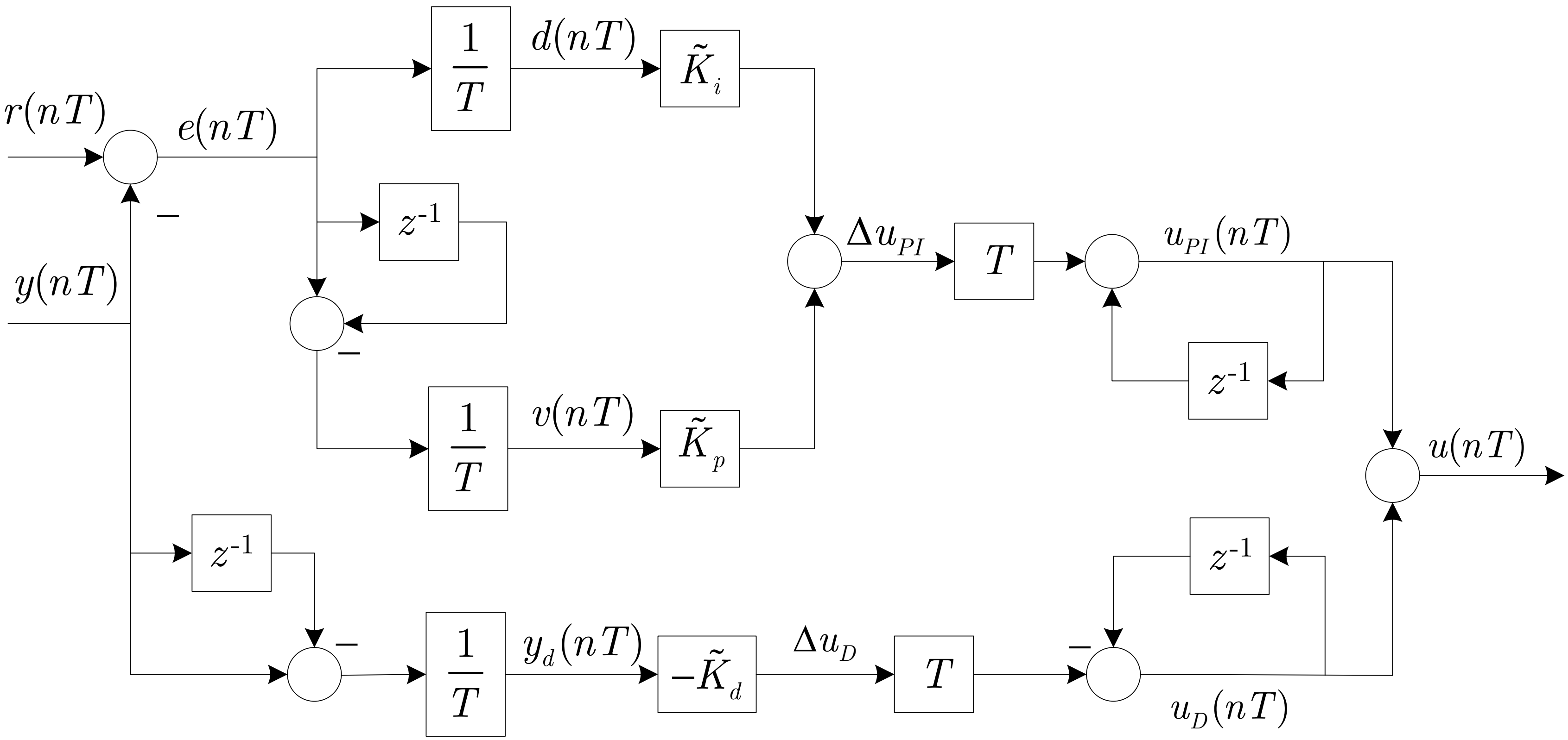
$$\Delta u_D(nT) = -\underbrace{\frac{2K_d}{T}}_{\tilde{K}_d} \frac{y(nT) - y(nT - T)}{T} = -\tilde{K}_d y_d(nT)$$

Konačno upravljački signal je jednak:

$$u_{PID}(nT) = u_{PI}(nT) + u_D(nT)$$

Fazi PID regulator

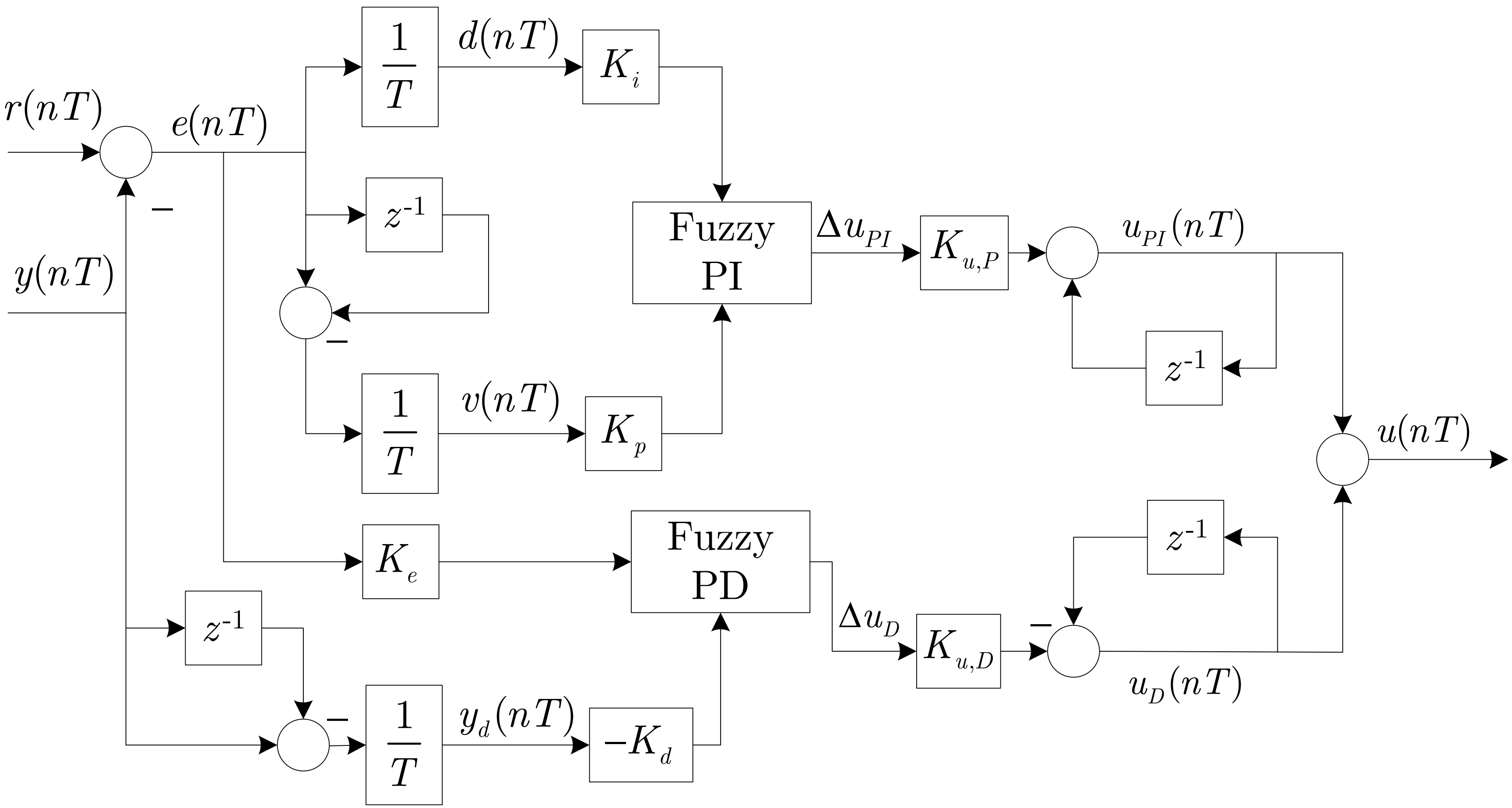
Šema PI+D regulatora



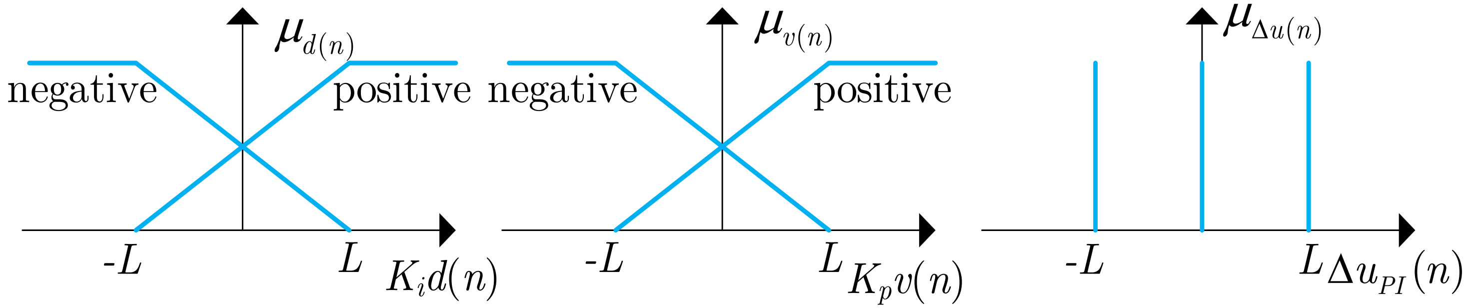
Kod fuzzy PID-a
- sumator se zamjenjuje fazi sistemom
- pojačanja T se zamjenjuje pojačanjima $K_{u,P}$ i $K_{u,D}$

Šema fazi PI+D regulatora

U fazi PD se dovodi još jedan ulaz - $K_e e(nT)$



Funkcije pripadnosti i fazi baza pravila PI regulatora



Funkcije pripadnosti i baza fazi pravila se definišu na isti način kao kod PI regulatora. Slično kao kod PI regulatora, $K_i d(n)$-$K_p v(n)$ ravan se dijeli na 20 regiona i za svaki region se može odrediti vrijednost upravljačkog signala.

$$R^{(1)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } P \text{ and } v(n) \text{ is } P \text{ then } \Delta u_{PI}(n) = P$$

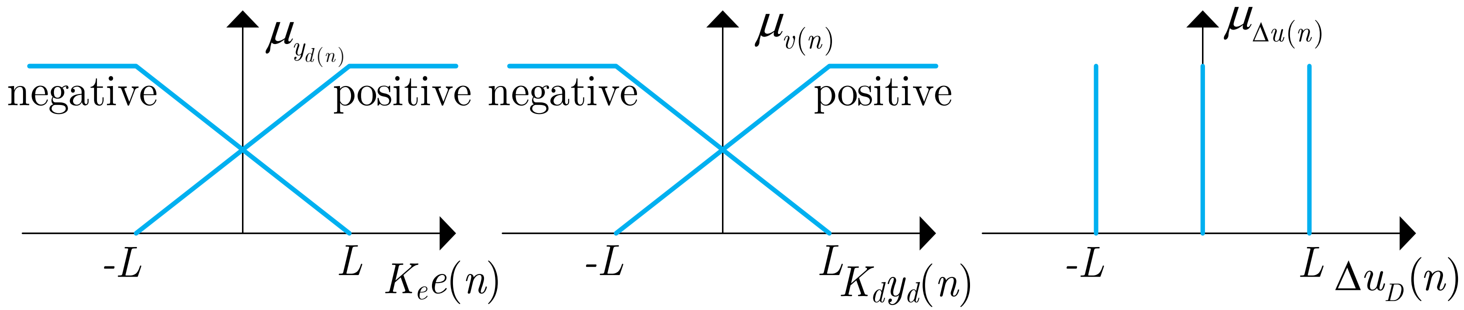
$$R^{(2)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } P \text{ and } v(n) \text{ is } N \text{ then } \Delta u_{PI}(n) = Z$$

$$R^{(3)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } N \text{ and } v(n) \text{ is } P \text{ then } \Delta u_{PI}(n) = Z$$

$$R^{(4)} \quad \text{if } d(n) \text{ is } N \text{ and } v(n) \text{ is } N \text{ then } \Delta u_{PI}(n) = N$$

Fazi PID regulator

Funkcije pripadnosti i fazi baza pravila D regulatora



Funkcije pripadnosti i baza fazi pravila se definišu na isti način kao kod PD regulatora. U ovom slučaju, $K_e e(n)$-$K_d v(n)$ ravan se dijeli na 20 regiona i za svaki region se može odrediti vrijednost upravljačkog signala.

$$R^{(1)} \quad \text{if } e(n) \text{ is } P \text{ and } y_{d(n)} \text{ is } P \text{ then } \Delta u_d(n) = Z$$

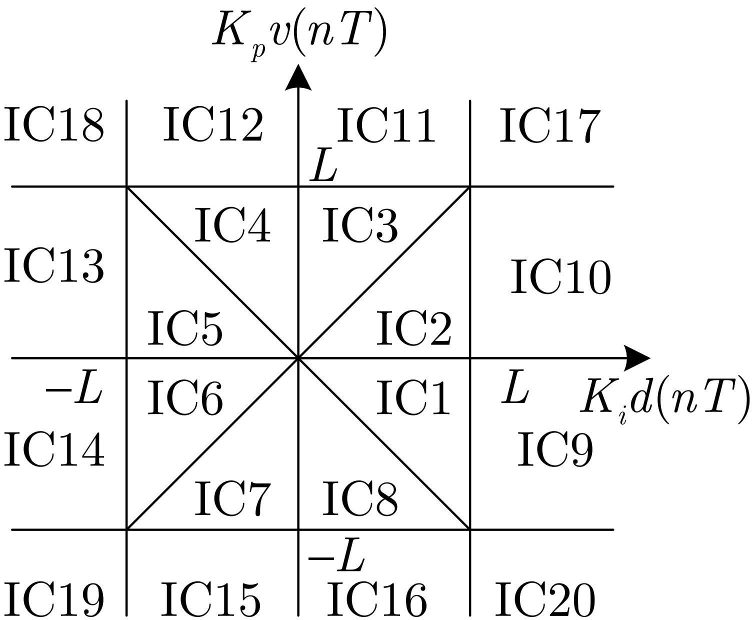
$$R^{(2)} \quad \text{if } e(n) \text{ is } P \text{ and } y_{d(n)} \text{ is } N \text{ then } \Delta u_d(n) = P$$

$$R^{(3)} \quad \text{if } e(n) \text{ is } N \text{ and } y_{d(n)} \text{ is } P \text{ then } \Delta u_d(n) = N$$

$$R^{(4)} \quad \text{if } e(n) \text{ is } N \text{ and } y_{d(n)} \text{ is } N \text{ then } \Delta u_d(n) = Z$$

Fazi PID regulator

Jednačine i regioni fazi PI regulatora



$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{L\left(K_i d(nT) + K_p v(nT)\right)}{2\left(2L - K_i \mid e(nT) \mid\right)}, \text{ IC1, IC2, IC5, IC6}$$

$$= \frac{L\left(K_i d(nT) + K_p v(nT)\right)}{2\left(2L - K_p \mid v(nT) \mid\right)}, \text{ IC3, IC4, IC7, IC8}$$

$$= \frac{1}{2}\left(L + K_p v(nT)\right), \text{ IC9, IC10}$$

$$= \frac{1}{2}\left(L + K_i d(nT)\right), \text{ IC11, IC12}$$

$$= \frac{1}{2}\left(-L + K_p v(nT)\right), \text{ IC13, IC14}$$

$$= \frac{1}{2}\left(-L + K_i d(nT)\right), \text{ IC15, IC16}$$

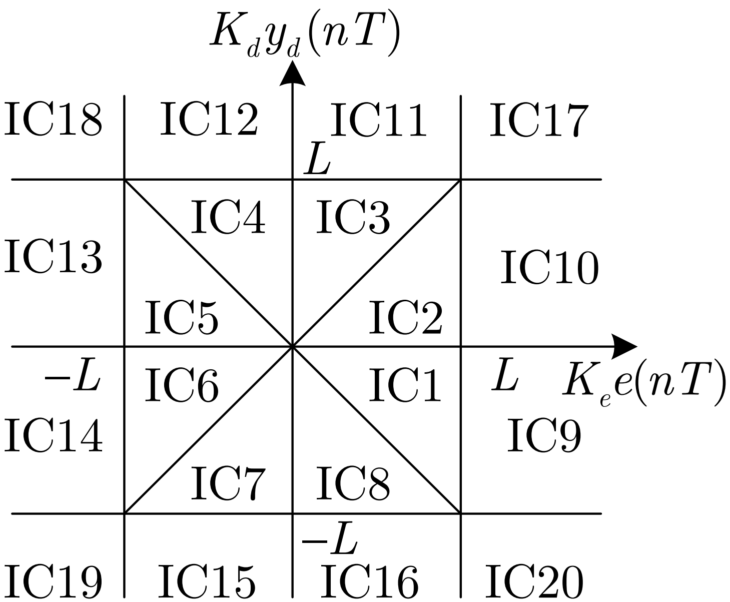
$$= 0, \text{ IC18, IC20}$$

$$= -L, \text{IC17}$$

$$= L, \text{ IC19}$$

Fazi PID regulator

Jednačine i regioni fazi D regulatora



$$\Delta u_{PD}(nT) = \frac{L\left(K_e e(nT) - K_d y_d(nT)\right)}{2\left(2L - K_p \mid e(nT) \mid\right)},\ \text{IC1, IC2, IC5, IC6}$$

$$= \frac{L\left(K_e e(nT) + K_d y_d(nT)\right)}{2\left(2L - K_d \mid y_d(nT) \mid\right)},\ \text{IC3, IC4, IC7, IC8}$$

$$= \frac{1}{2}\left(L - K_d y_d(nT)\right),\ \text{IC9, IC10}$$

$$= \frac{1}{2}\left(-L + K_e e(nT)\right),\ \text{IC11, IC12}$$

$$= \frac{1}{2}\left(-L - K_d y_d(nT)\right),\ \text{IC13, IC14}$$

$$= \frac{1}{2}\left(L + K_e e(nT)\right),\ \text{IC15, IC16}$$

$$= 0,\ \text{IC18, IC20}$$

$$= -L,\ \text{IC17}$$

$$= L,\ \text{IC19}$$

Primjer – Fuzzy PID regulator

Proces je opisan sljedećom diferencijalnom jednačinom:

$$\dot{y}(t) = 0.0001\left|y(t)\right| + u(t)$$

Simulirati odziv fuzzy PID regulatora, za sljedeće parametre:

$$T = 0.1,\ K_d = 0.5, K_p = 1.5, K_i = 0.2, K_{u,PI} = 0.11, K_{u,D} = 0.1,\ L = 45$$

Referentni signal je step funkcije amplitude 10.