

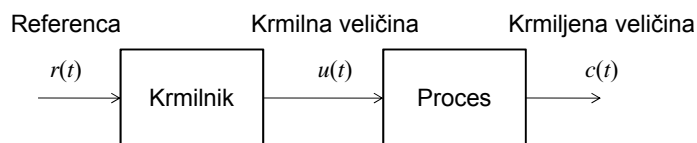


## 5. Regulacijski sistemi

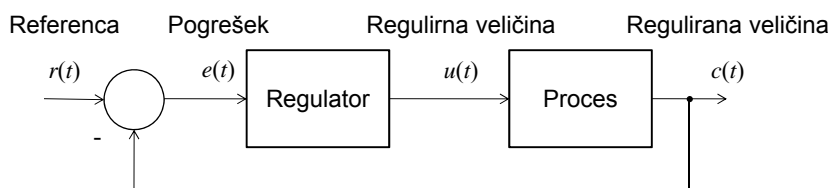
- Sledilno in regulacijsko delovanje
- Blokovni diagram zaprtozančnega sistema in pripadajoče prenosne funkcije
- Učinki povratne zanke
- Proporcionalni regulator
- Proporcionalno-integrirni regulator
- Nastavljanje regulatorjev
- Računalniška izvedba regulatorjev

### Odprto- in zaprto-zančno vodenje

- Odprtozančno vodenje



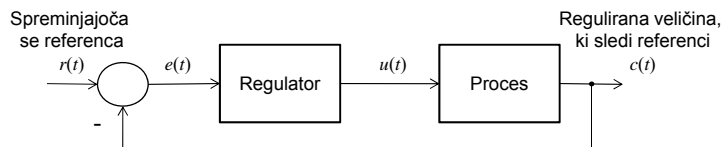
- Zaprtozančno vodenje



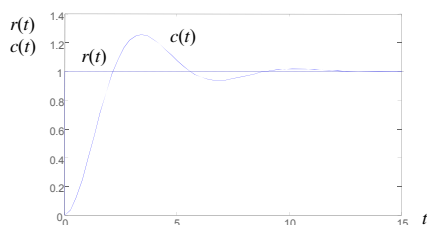
## 5.1 Sledilno in regulacijsko delovanje

- Sledilno delovanje

- želimo, da regulirana veličina sledi referenčni veličini



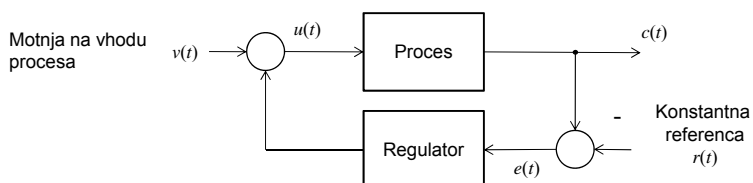
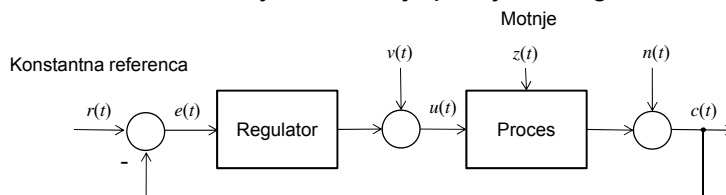
- značilen potek



## Sledilno in regulacijsko delovanje /2

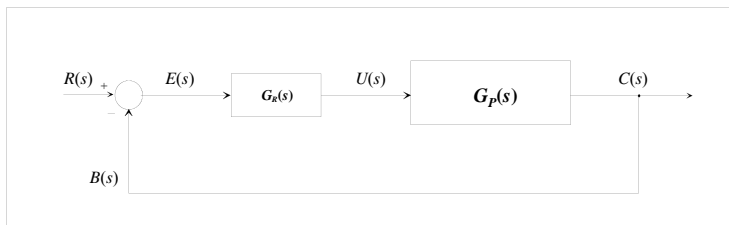
- Regulacijsko delovanje

- želimo, da motnje čim manj vplivajo na regulirano veličino



## 5.2 Blokovni diagram regulacijskega sistema

- Enotina povratna zanka



- Prenosna funkcija direktne veje:

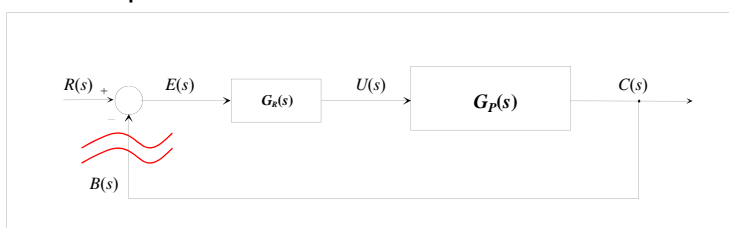
$$G(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = G_R(s) \cdot G_P(s)$$

- Prenosna funkcija povratne zanke:

$$H(s) = \frac{B(s)}{C(s)} = 1$$

## Blokovni diagram regulacijskega sistema

- Enotina povratna zanka

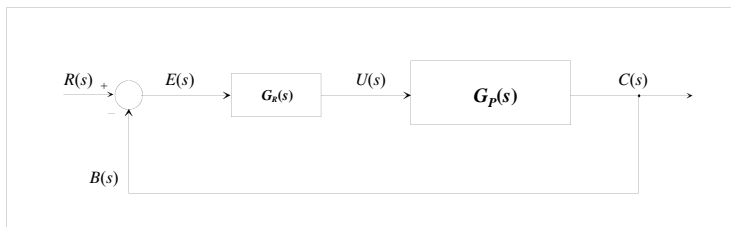


- Odprtozančna prenosna funkcija:

$$G_{od}(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = G_R(s) G_P(s) = G(s)$$

## Blokovni diagram regulacijskega sistema

- Enotina povratna zanka

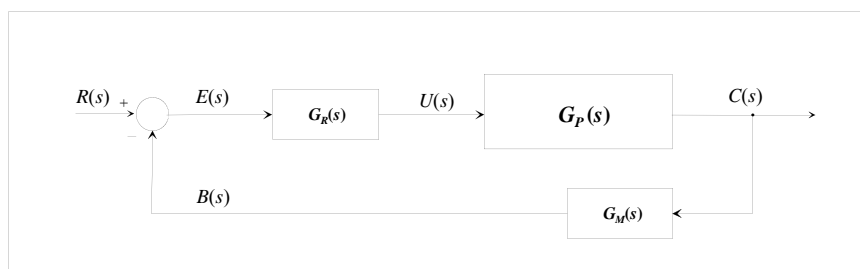


- Zaprtozančna prenosna funkcija:

$$\begin{aligned} G_{zz}(s) &= \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s) G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s)} = \\ &= \frac{G(s)}{1 + G(s)} \end{aligned}$$

## Blokovni diagram regulacijskega sistema

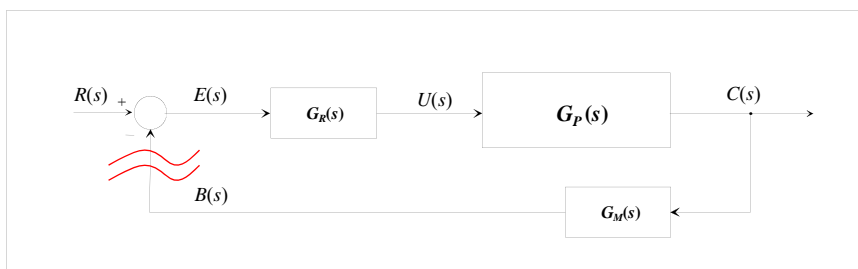
- Povratna zanka s prenosno funkcijo različno od 1



- Prenosna funkcija direktne veje:  
 $G(s) = C(s)/E(s) = G_R(s)G_P(s)$
- Prenosna funkcija povratne zanke:  
 $H(s) = B(s)/C(s) = G_M(s)$

## Blokovni diagram regulacijskega sistema

- Povratna zanka s prenosno funkcijo različno od 1

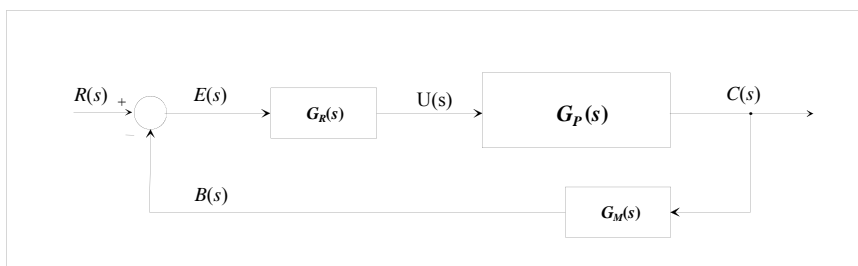


- Odprtozančna prenosna funkcija:

$$G_{od}(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = G_R(s) G_P(s) G_M(s) = G(s) H(s)$$

## Blokovni diagram regulacijskega sistema

- Povratna zanka s prenosno funkcijo različno od 1

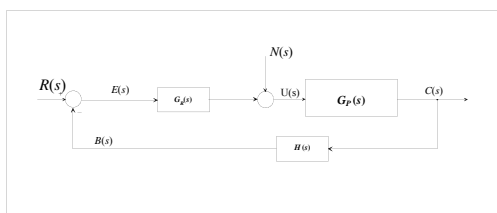


- Zaprtozančna prenosna funkcija:

$$\begin{aligned} G_{zz}(s) &= \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s) G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) G_M(s)} = \\ &= \frac{G(s)}{1 + G(s) H(s)} \end{aligned}$$

## Vpliv povratne zanke pri sledilnem in regulacijskem delovanju

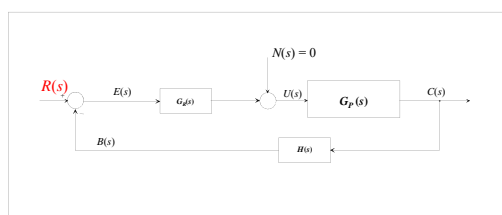
- Obravnavamo sistem



- na  $C(s)$  delujeta tako referenca  $R(s)$  kot motnja  $N(s)$
- ker velja princip superpozicije, lahko referenco in motnjo obravnavamo ločeno, njun vpliv na  $C(s)$  pa seštejemo:

$$C(s) = C_R(s) + C_N(s)$$

**Sledilno delovanje:**  
cilj delovanja je čim boljše **SLEDENJE**  
referenčnemu signalu

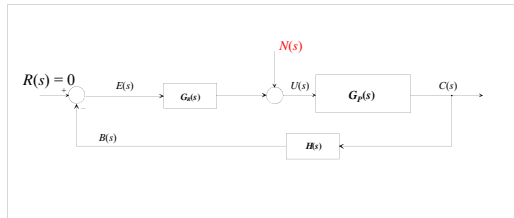


$$G_{zzl}(s) = \frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s) G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) H(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) H(s)}$$

$$C_R(s) = \frac{G_R(s) G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) H(s)} R(s)$$

Cilj načrtovanja:  
 $G_{zzl}(s) = 1$

## Regulacijsko delovanje: cilj delovanja je čim učinkovitejše ZMANJŠEVANJE MOTILNIH VPLIVOV



$$G_{zz2}(s) = \frac{C_N(s)}{N(s)} = \frac{G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) H(s)} = \frac{G_P(s)}{1 + G(s) H(s)}$$

$$C_N(s) = \frac{G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) H(s)} N(s)$$

Cilj načrtovanja:  
 $G_{zz2}(s) = 0$

## Vpliv povratne zanke pri sledilnem in regulacijskem delovanju

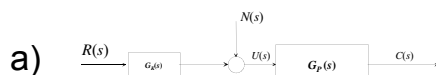
- Odziv  $C(s)$  je sestavljen iz obeh prispevkov

$$C(s) = C_R(s) + C_N(s) = \frac{G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s) H(s)} [G_R(s) R(s) + N(s)]$$

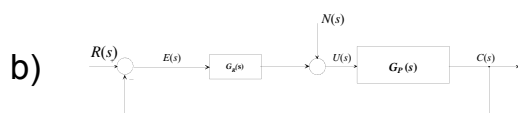
- Če je  $|G_R(s)G_P(s)H(s)| \gg 1$ , potem velja:
  - če tudi  $|G_R(s)H(s)| \gg 1$ , postane abs. vrednost  $G_{zz2}(s)$  približno nič
    - povratna zanka duši učinek motnje
  - abs. vrednost  $G_{zz1}(s)$  je približno  $|1 / H(s)|$ 
    - zaprtozančna prenosna funkcija ni odvisna od  $G_R(s)$  in  $G_P(s)$
    - če je  $H(s) = 1$  (enotina povratna zanka) dobimo sledenje referenci

## 5.3 Učinki povratne zanke

- Primerjamo odprtozančno in zaprtozančno vodenje (enotina povratna zanka)



$$C(s) = G_P(s) [ G_K(s) R(s) + N(s) ]$$



$$C(s) = \frac{G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s)} [ G_R(s) R(s) + N(s) ]$$

### 1. učinek povratne zanke

- Odprtozančno
  - spremembe v  $G_K(s)$  ali  $G_P(s)$  neposredno vplivajo na  $C(s)$
- Zaprtozančno
  - spremembe v  $G_R(s)$  ali  $G_P(s)$  so deljene s faktorjem  $1 + G_R(s)G_P(s)$
  - če je  $|G_R(s)G_P(s)| \gg 1$ , potem je vpliv teh sprememb na  $C(s)$  zanemarljivo majhen

Povratna zanka zmanjša občutljivost na spremembe parametrov sistema



## 2. učinek povratne zanke

- Odprtozančno
  - motnja vpliva na  $C(s)$  preko produkta  $G_p(s) N(s)$
- Zaprtozančno
  - vpliv motnje na  $C(s)$  je v primerjavi z odprtozančnim vodenjem zmanjšan za faktor  $1 + G_R(s)G_P(s)$

Povratna zanka praviloma zmanjša občutljivost na motnje

## 3. učinek povratne zanke

- Odprtozančno
  - odziv  $C(s)$  na  $R(s)$  vsebuje dinamiko sistema  $G_p(s)$
  - odziv krmiljenega sistema ne more biti hitrejši od odziva sistema brez krmiljenja
- Zaprtozančno
  - odziv  $C(s)$  na  $R(s)$  določa prenosna funkcija, v kateri je funkcija  $G_p(s)$  deljena s faktorjem  $1 + G_R(s)G_P(s)$
  - dinamika zaprtozančnega sistema je lahko drugačna od dinamike sistema brez vodenja
  - odziv zaprtozančnega sistema je lahko hitrejši

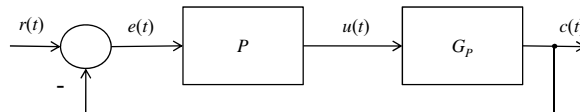
Povratna zanka spremeni dinamično obnašanje sistema

## 4. učinek povratne zanke

- Odprtozančno
  - odziv  $C(s)$  na  $R(s)$  vsebuje dinamiko sistema  $G_p(s)$
  - če je sistem nestabilen, ga s krmiljenjem ne moremo stabilizirati
- Zaprtozančno
  - odziv  $C(s)$  na  $R(s)$  določa prenosna funkcija, v kateri je funkcija  $G_p(s)$  deljena s faktorjem  $1 + G_R(s)G_p(s)$
  - če ležijo ničle izraza  $1 + G_R(s)G_p(s)$  v levi strani kompleksne ravnine, je zaprtozančni sistem stabilen

Povratna zanka lahko stabilizira sistem

## 5.4 Proporcionalni regulator



- tudi P-regulator
- regulirna veličina je proporcionalna pogreški oz. razliki med želeno in regulirano veličino

$$G_R(s) = P(s) = K_P$$

## Primer zaprtozančne prenosne funkcije sistema s P-regulatorjem

- Proces 1. reda  $G_P(s) = \frac{K}{Ts + 1}$

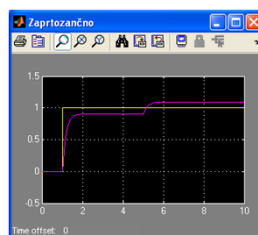
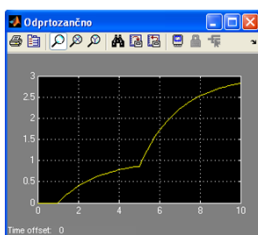
$$G_{zz}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s) G_P(s)}{1 + G_R(s) G_P(s)} =$$

$$= \frac{K_p \frac{K}{Ts+1}}{1 + K_p \frac{K}{Ts+1}} = \frac{\frac{K_p K}{1 + K_p K}}{\frac{T}{1 + K_p K} s + 1}$$

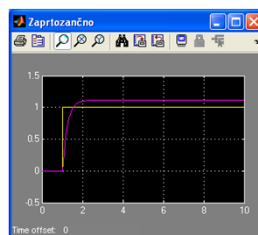
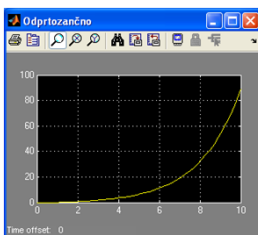
- zaprtozančni sistem je še vedno proces 1. reda, ki pa ima drugačno ojačenje in drugačno časovno konstanto
- ojačenje je različno od 1 – pogrešek v ustaljenem stanju

## Primeri učinkov povratne zanke (P-regulator in proces 1. reda)

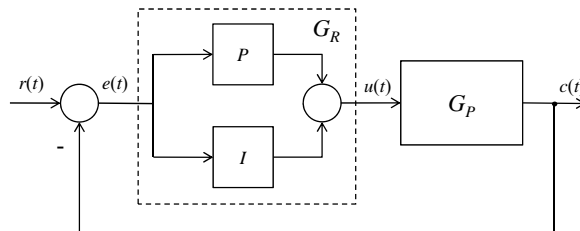
- sledenje referenci in vpliv motnje



- nestabilen proces



## 5.5 Proporcionalno-integrirni regulator



- tudi PI-regulator
- regulirna veličina je proporcionalna pogreški in integralu pogreška

$$G_R(s) = P(s) + I(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

### Primer zaprtozančne prenosne funkcije sistema s PI-regulatorjem

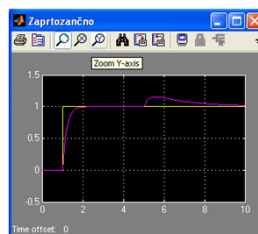
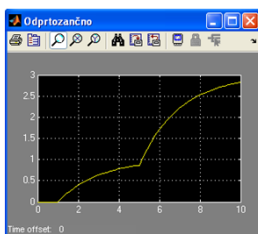
- Proces 1. reda  $G_p(s) = \frac{K}{T s + 1}$

$$\begin{aligned} G_{zz}(s) &= \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s) G_p(s)}{1 + G_R(s) G_p(s)} = \frac{K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{K}{T s + 1}}{1 + K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{K}{T s + 1}} = \\ &= \frac{\frac{K_p K}{T_i T} (T_i s + 1)}{s^2 + \frac{1 + K_p K}{T} s + \frac{K_p K}{T_i T}} \end{aligned}$$

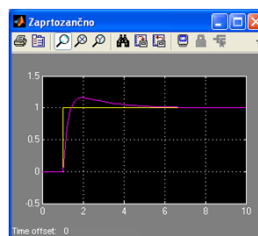
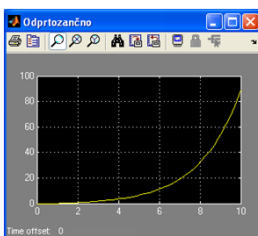
- zaprtozančni sistem je sistem 2. reda
- od parametrov  $K_p$  in  $T_i$  je odvisno, ali bo sistem podkritično ali nadkritično dušen – ali bo prehodni pojav nihajoč ali ne
- ojačenje zaprtozančnega sistema je 1 – ni pogreška v ustaljenem stanju

## Primeri učinkov povratne zanke (PI-regulator in proces 1. reda)

- sledenje referenci in vpliv motnje

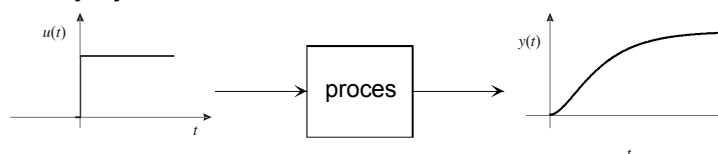


- nestabilen proces



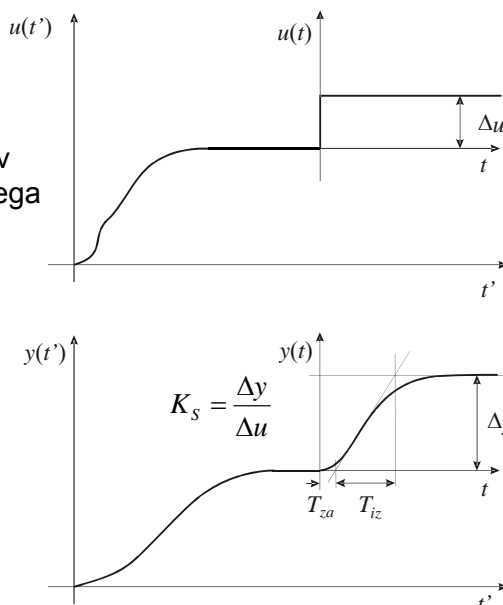
## 5.6 Nastavljanje regulatorjev

- Nastavitev regulatorja
  - vpliva na dinamične lastnosti in s tem na kvaliteto regulacijskega sistema
  - je odvisna od dinamičnih lastnosti procesa oz. odprtozračnega sistema
- Dinamične lastnosti procesa lahko ocenimo z eksperimentom
  - npr. z merjenjem odprtozračnega odziva na stopničasto vzbujanje



## Merjenje odziva na stopnico

- Postopek:
  - proces pripeljemo v okolico obratovalnega stanja
  - ko se razmere ustalijo, naredimo stopničasto spremembo vhodnega signala
  - izmerimo prehodni pojav in iz njega odčitamo značilne parametre



## Nastavitvena pravila za PI-regulator - proces 1. reda

- Zaprtozančno prenosno funkcijo zapišemo nekoliko drugače

$$G_{zz}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_R(s)G_P(s)}{1 + G_R(s)G_P(s)} = \frac{K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \frac{K}{T_I s + 1}}{1 + \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \frac{K}{T_I s + 1}} = \frac{\frac{K_P K (T_I s + 1)}{T_I s (T_I s + 1)}}{1 + \frac{K_P K (T_I s + 1)}{T_I s (T_I s + 1)}}$$

- zaprtozančna prenosna funkcija se poenostavi, če nastavimo  $T_I = T$

$$G_{zz}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_P K}{T_I s}}{1 + \frac{K_P K}{T_I s}} = \frac{K_P K}{T_I s + K_P K} = \frac{1}{\frac{T_I}{K_P K} s + 1}$$

## Nastavitvena pravila za P- in PI-regulator ter proces 1. reda

- Z izbiro  $K_P$  vplivamo na dinamiko regulacijskega sistema (podobno velja tudi za P-regulator)

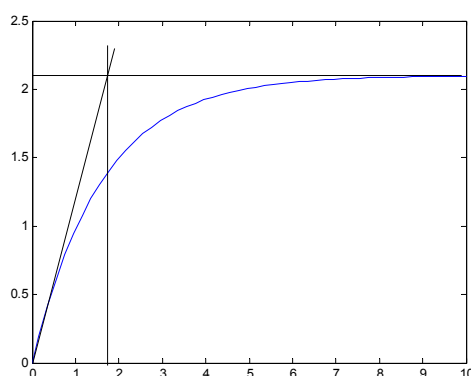
- Nastavitvena pravila:

| regulator | $K_P$                                                                      | $T_I$ |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| P         | $\frac{T_s - T_{zel}}{K_s T_{zel}}$ ali $\frac{K_{zel}}{K_s(1 - K_{zel})}$ | /     |
| PI        | $\frac{T_s}{T_{zel} K_s}$                                                  | $T_s$ |

- $K_s$  in  $T_s$  sta ocenjena parametra procesa:  $K_s \approx K$ ,  $T_s = T_{iz} \approx T$ ,  $T_{za} = 0$
- $K_{zel}$  je želeno ojačenje zaprtozančnega sistema
- $T_{zel}$  je zelena časovna konstanta zaprtozančnega sistema

## Primer nastavitve regulatorja za proces 1. reda

- Odziv
  - vhod je enotina stopnica ( $\Delta u = 1$ )



- Ocenjena parametra  
 $K_s = 2.1$ ,  $T_s = 1.7$

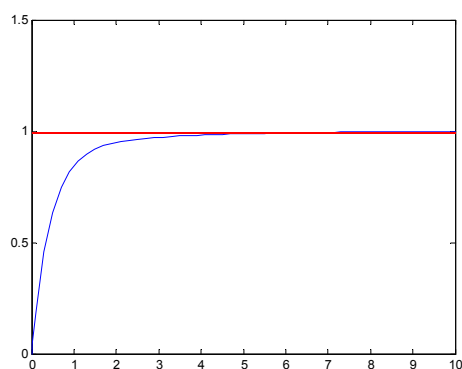
## Primer nastavitve regulatorja za proces 1. reda

- Parametra regulatorja

- izberemo  $T_{zel} = 0.5$ :  $K_P = \frac{T_s}{T_{zel} K_s} = \frac{1.7}{0.5 \cdot 2.1} \approx 1.62$ ,  $T_I = 2.1$

- Zaprtizančni odziv

- referenca ima obliko enotine stopnice



## Nastavitvena pravila za P- in PI-regulator ter proces višjega reda

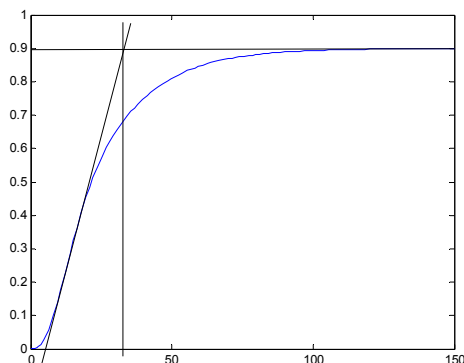
- Iz odziva na stopnico ocenimo tudi čas zakasnitve
- Nastavitev je odvisna od zahtev pri regulaciji

| regulator |       | aperiodični odziv z najkrajšim $T_{um}$ |                                 | najkrajši $T_{um}$ z 20% prenihajem |                                 |
|-----------|-------|-----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
|           |       | motnja                                  | referenca                       | motnja                              | referenca                       |
| P         | $K_P$ | $\frac{0.3 T_{iz}}{K_s T_{za}}$         | $\frac{0.3 T_{iz}}{K_s T_{za}}$ | $\frac{0.7 T_{iz}}{K_s T_{za}}$     | $\frac{0.7 T_{iz}}{K_s T_{za}}$ |
|           | $T_I$ | $4 T_{za}$                              | $1.2 T_{iz}$                    | $2.3 T_{za}$                        | $T_{iz}$                        |



## Primer nastavitve regulatorja za proces višjega reda

- Odziv
  - vhod je enotina stopnica ( $\Delta u = 1$ )



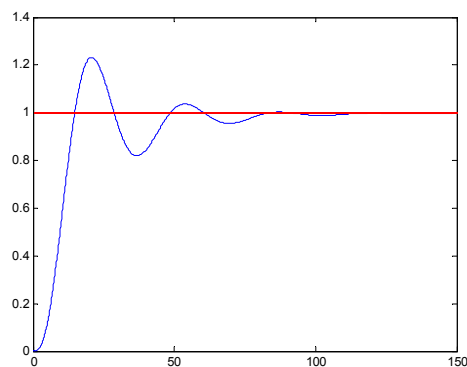
- Ocenjeni parametri  
 $K_s = 0.9, T_{za} = 6, T_{iz} = 30$

## Primer nastavitve regulatorja za proces višjega reda

- Parametra regulatorja
  - izberemo pravilo za 20% prenihaj

$$K_P = \frac{0.6T_{iz}}{K_s T_{za}} = \frac{0.6 \cdot 30}{0.9 \cdot 6} \approx 3.33, \quad T_I = 30$$

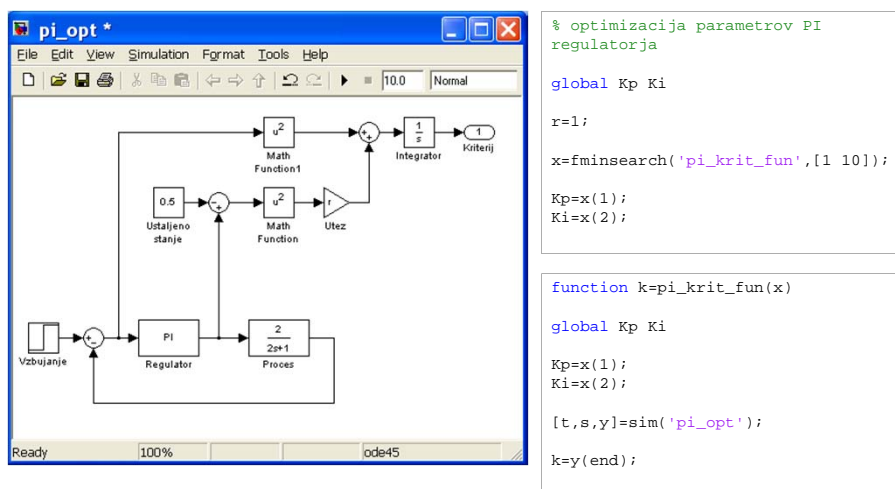
- Zaprtzančni odziv
  - referenca ima obliko enotine stopnice



## Optimizacija parametrov regulatorja z računalnikom

- Če poznamo matematični model procesa, lahko regulator nastavimo s pomočjo preizkušanja na simuliranem procesu
- Postopek lahko avtomatiziramo
  - nastavimo začetne vrednosti parametrov regulatorja
  - izvede se simulacijski eksperiment
  - izračunani poteki signalov v regulacijskem sistemu se ovrednotijo po predpisanem kriteriju
  - optimizacijski algoritem spremeni nastavitve regulatorja glede na izračunano vrednost kriterija
  - postopek simulacije, ovrednotenja in nastavljanja se ponavlja, konča se ob izpolnitvi določenih pogojev

## Primer optimizacije parametrov regulatorja z računalnikom



## 5.7 Računalniška izvedba regulatorjev

- Razvoj industrijskih regulatorjev
  - v preteklosti: mehanski, pnevmatski, hidravlični regulatorji
  - električni signali nadomeščajo pnevmatske
  - analogni elektronski regulatorji
    - regulacijski algoritem realiziran z elektronskim vezjem
  - mikroprocesorski regulatorji
- Značilnosti mikroprocesorskih regulatorjev
  - regulacijski algoritem izvaja program
  - program omogoča številne dodatne funkcije
  - možnost komuniciranja z drugimi napravami in možnost vključevanja v komunikacijska omrežja

### Primeri

Eurotherm



Siemens

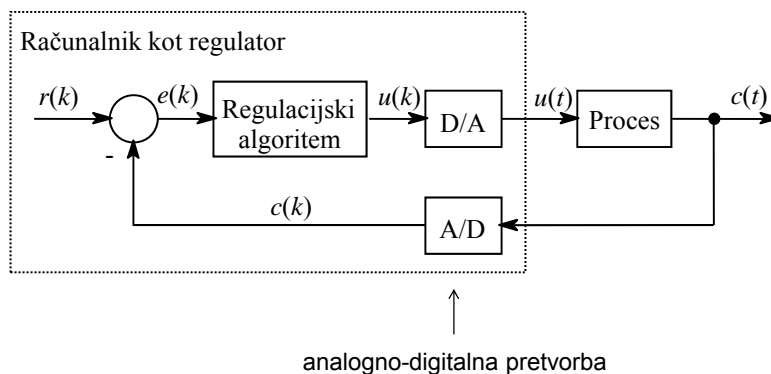
Foxboro



Honeywell



## Računalniška izvedba PI-algoritma

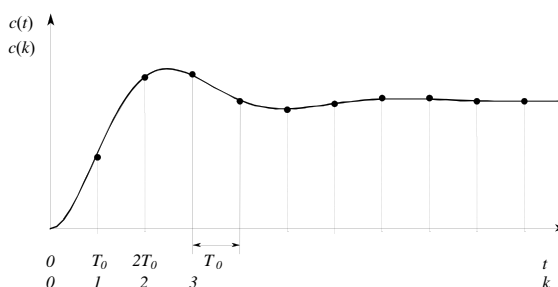


## Zvezni in vzorčeni signali

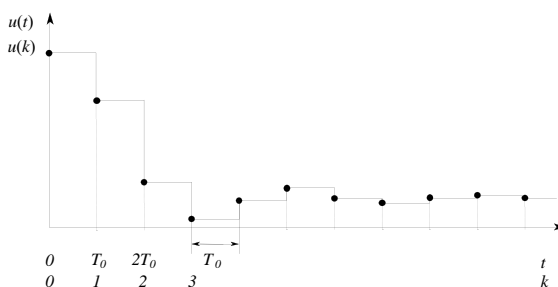
Vzorčenje:

$$c(k) = c(t) \Big|_{t=kT_0}$$

$T_0$  imenujemo čas vzorčenja



Rekonstrukcija:  
- zadrževalnik 0. reda (Zero order hold ZOH)



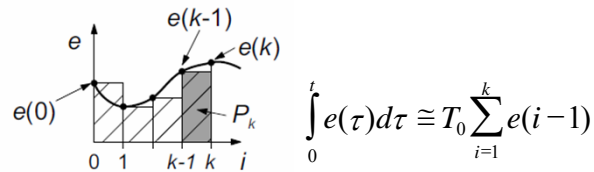
## Diskretni PI-algorem

Zvezni PI

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right); \quad u(t) = K_P \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right]$$

Diskretizacija:

integral -> vsota



Diskretni PI

$$u(k) = K_P \left[ e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) \right]$$

## Rekurzivna oblika

$$u(k) = K_P \left[ e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) \right] = K_P e(k) + \frac{K_P T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) = P_k + I_k$$

$$I_k = \frac{K_P T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1)$$


$$I_{k-1} = \frac{K_P T_0}{T_I} \sum_{i=1}^{k-1} e(i-1)$$

Po odštevanju:

$$I_k - I_{k-1} = \frac{K_P T_0}{T_I} e(k-1) \Rightarrow I_k = I_{k-1} + \frac{K_P T_0}{T_I} e(k-1)$$

integral pogreška računamo rekurzivno

## Izvedba diskretnega PI-algoritma

- Algoritem se izvaja v zanki, katere izvajanje je usklajeno s taktom vzorčenja  $T_0$
- Osnovni koraki:
  1. vzorčenje izhoda procesa (A/D), primerjava z želeno vrednostjo in izračun pogoška,
  2. izračun regulirnega signala, 
  3. prenos regulirnega signala na izhod regulatorja (D/A),
  4. čakanje na nov trenutek vzorčenja in zatem vrnitev na 1. korak;

```
.  
. .  
pk := Kp*e;  
ik := ik1 + Kp*T0/Ti*e1;  
u := ik + pk;  
ik1 := ik;  
e1 := e;  
. .  
.
```