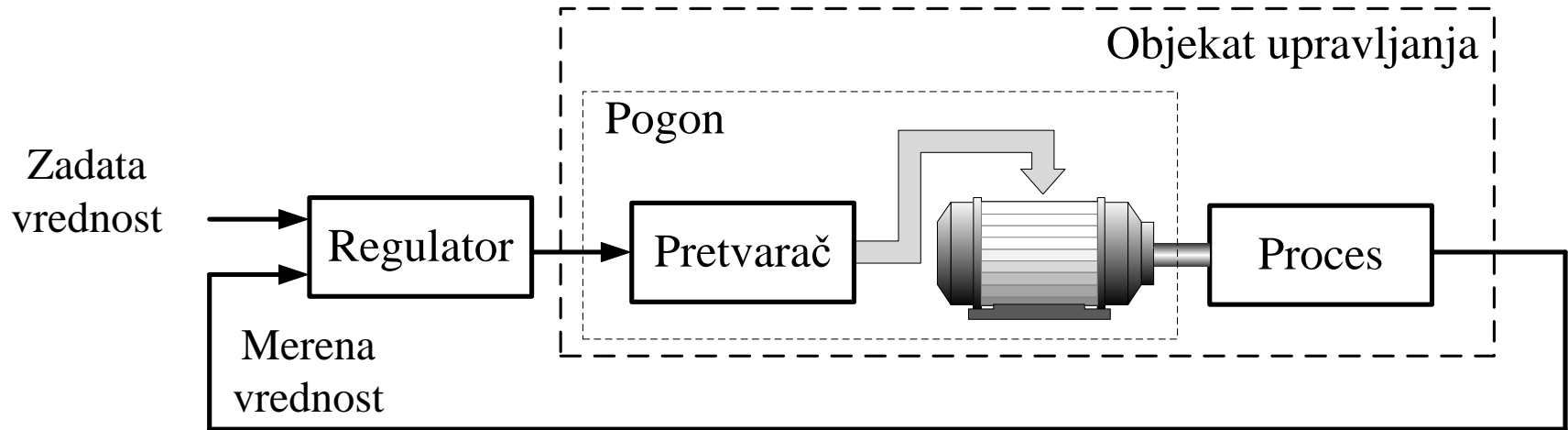


Regulisani elektromotorni pogon

- Regulisani elektromotorni pogon (RP) je sistem koji obezbeđuje:
 - rad sa željenom brzinom nezavisno od opterećenja, ili
 - rad sa željenim momentom nezavisno od brzine, ili
 - precizno pozicioniranje, ili
 - održavanje neke procesne veličine na zadatoj vrednosti.
- RP se primenjuju u složenim tehnološkim procesima.
- RP omogućuju uštedu energije (u pogonima pumpi, ventilatora, kompresora).
- RP bi u perspektivi trebalo da zamene neregulisane pogone u većem broju aplikacija, zbog niza prednosti.

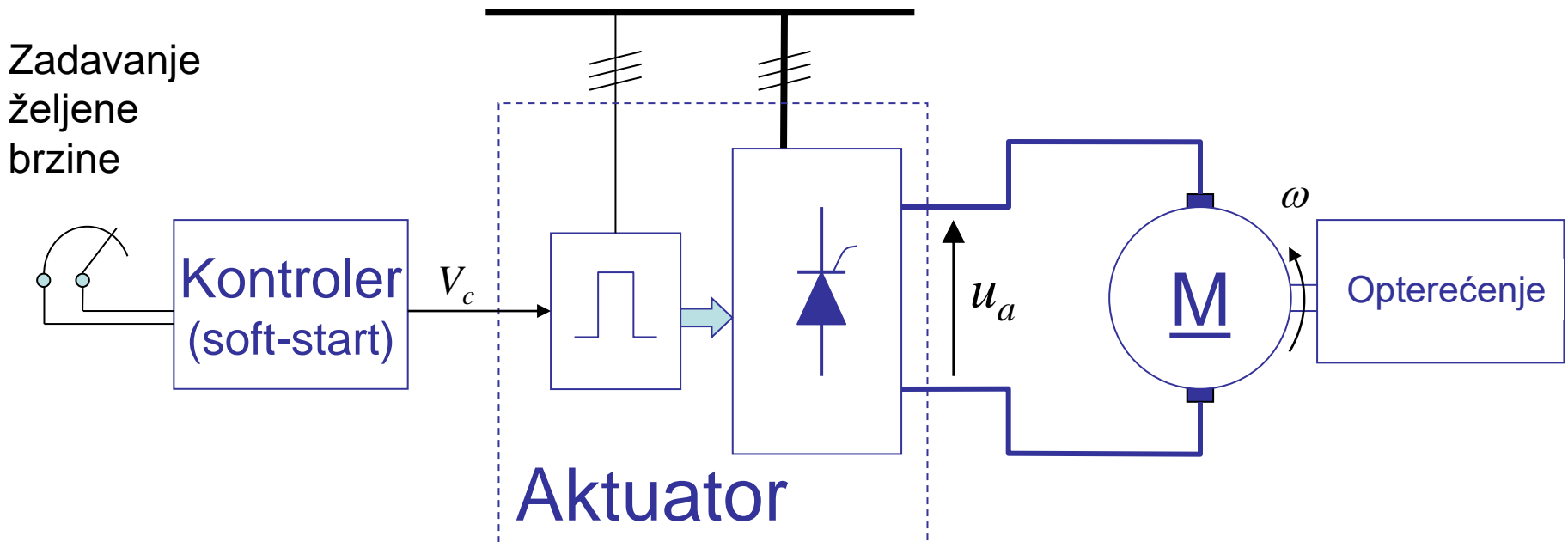
Opšta struktura regulisanog elektromotornog pogona



- **Proces ili objekat pokretanja** je uređaj, deo ili tehnološki postupak za čiji rad treba obezbediti mehaničku energiju sa potrebnim momentom i željenom brzinom obrtanja
- Proces (objekat pokretanja) i pogon zajedno čine **objekat upravljanja**
- Elektromotorni pogon čine motor i pretvarač (napajanje i mehanička sprega sa opterećenjem).
- Regulator na osnovu **zadate vrednosti** i informacija o stanju u objektu upravljanja (**merena vrednost**) generiše vrednosti upravljačkih veličina za upravljanje pretvaračem, tj. objektom upravljanja

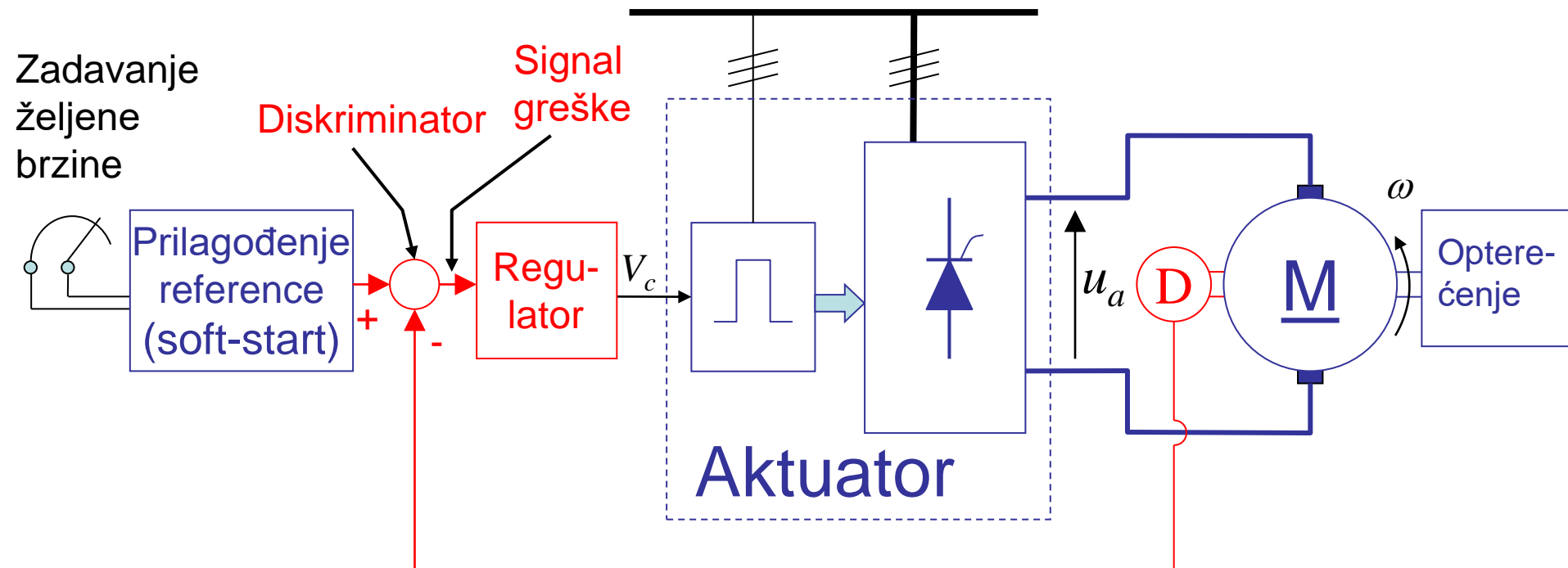
Elektromotorni pogon promenljive brzine – sistem bez povratne veze

UPRAVLJANJE - Pogon u otvorenoj sprezi
(primer pogona jednosmerne struje)



Regulisani elektromotorni pogon - sistem sa povratnom vezom

REGULACIJA - Pogon u zatvorenoj sprezi
(primer pogona jednosmerne struje)



Regulisani elektromotorni pogon - sistem sa povratnom vezom

Elementi karakteristični za regulisane elektromotorne pogone:

- Prilagođenje reference (u statičkom i dinamičkom smislu) (soft start);
- Diskriminator (u sastavu regulatora);
- Regulator;
- Davač regulisane veličine (merenje neelektričnih veličina, galvansko odvajanje);
- Povratna veza.

Regulatori



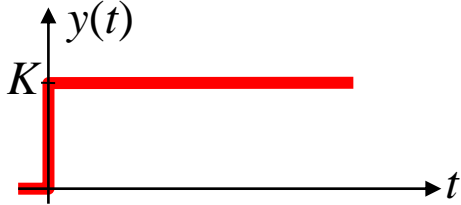
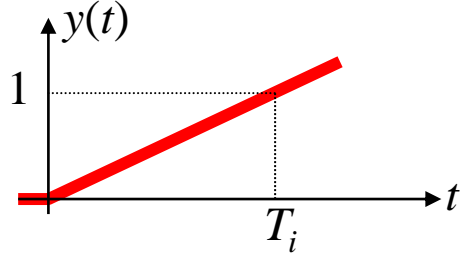
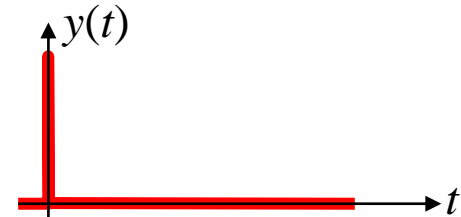
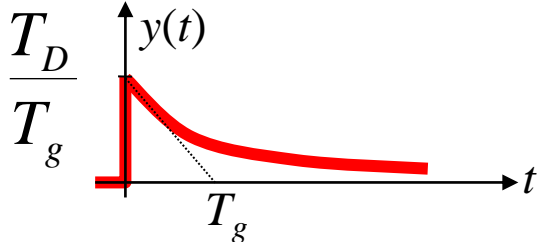
Regulator obezbeđuje:

- Statičke i dinamičke karakteristike RP;
- Odgovarajuću vrednost komandnog signala V_c

Vrste regulatora po karakteristici prenosa:

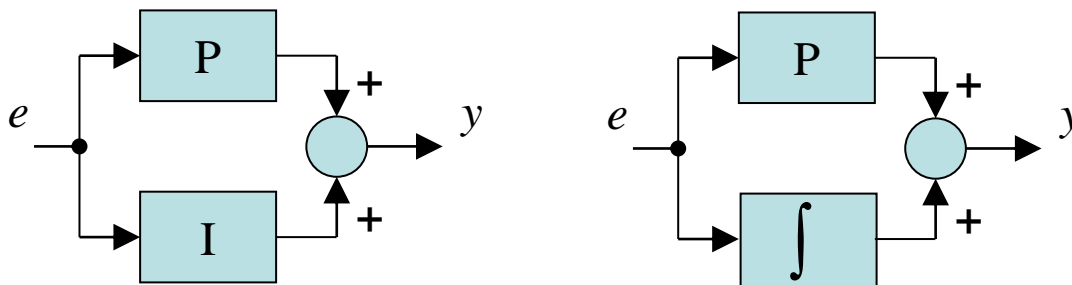
P ; I ; D ; **PI** ; PD ; **PID**.

Karakteristike osnovnih regulatora

| TIP | Dif. jednačina | Funkcija prenosa $\frac{y(p)}{e(p)}$ | Odziv na "jedinični step" |
|---------------|---|---------------------------------------|---|
| P | $y = K \cdot e$ | K |  |
| I | $\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot e$ | $\frac{1}{p \cdot T_i}$ |  |
| D | $y = T_D \cdot \frac{de}{dt}$ | $p \cdot T_D$ |  |
| "Realni" D | $T_g \cdot \frac{dy}{dt} + y = T_D \cdot \frac{de}{dt}$ | $\frac{p \cdot T_D}{1 + p \cdot T_g}$ |  |

Proporcionalno-Integralni tip regulatora

PI



Funkcija
prenosa:

$$\frac{y}{e}(p) = K + \frac{1}{p \cdot T_i} = K_p + \frac{K_i}{p} = \frac{1 + K \cdot T_i \cdot p}{p \cdot T_i} = K \cdot \frac{1 + T_n \cdot p}{p \cdot T_n}$$

$$K = K_p \quad K_i = 1/T_i$$

$$T_n = K \cdot T_i$$

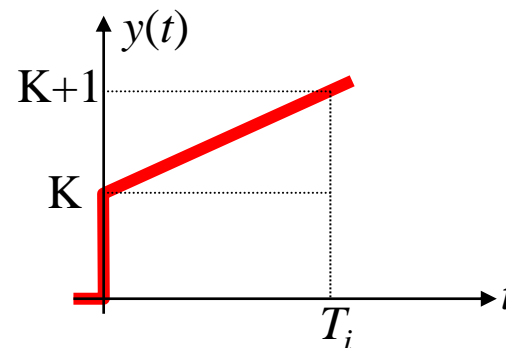
Dif. jed.:

$$T_i \frac{dy}{dt} = e + K \cdot T_i \cdot \frac{de}{dt}$$

$$K_i = K/T_n$$

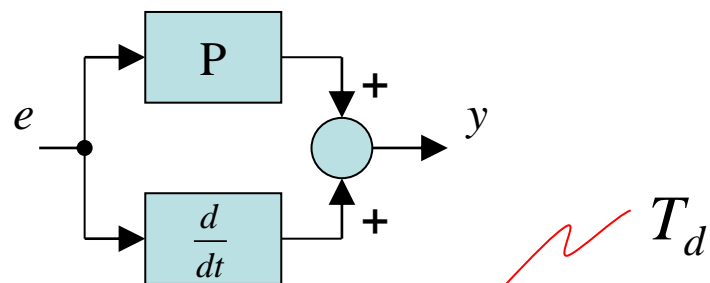
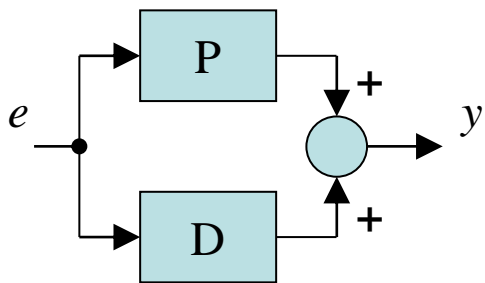
$$T_n \frac{dy}{dt} = K \cdot e + K \cdot T_n \cdot \frac{de}{dt}$$

$$\frac{dy}{dt} = K_p \cdot \frac{de}{dt} + K_i \cdot e$$



Proporcionalno-Diferencijalni tip regulatora

PD



Funkcija prenosa:

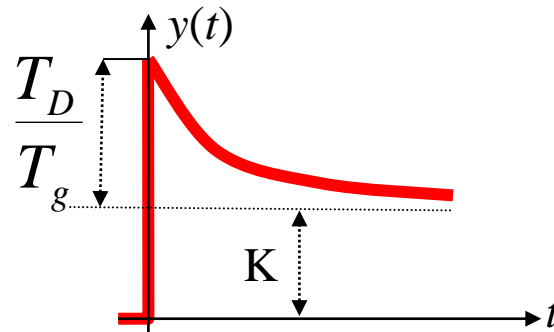
$$\frac{y}{e}(p) = K + \frac{p \cdot T_D}{1 + p \cdot T_g} = K \cdot \frac{1 + p \cdot \left(\frac{T_D}{K} + T_g \right)}{1 + p \cdot T_g}$$

$$T_d = \frac{T_D}{K} \gg T_g$$

$$\frac{y}{e}(p) \approx K \frac{1 + p \cdot T_d}{1 + p \cdot T_g}$$

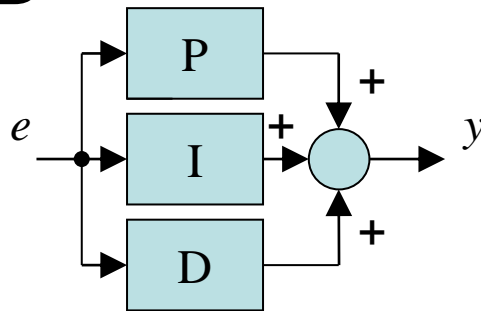
Dif. jed.:

$$y + T_g \frac{dy}{dt} = K \cdot e + K \cdot T_d \cdot \frac{de}{dt}$$



Proporcionalno-Integralno-Diferencijalni tip regulatora

PID



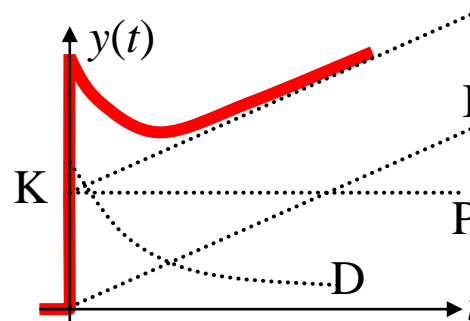
Funkcija prenosa:

$$\frac{y}{e}(p) = K + \frac{1}{p \cdot T_i} + \frac{p \cdot T_D}{1 + p \cdot T_g} =$$

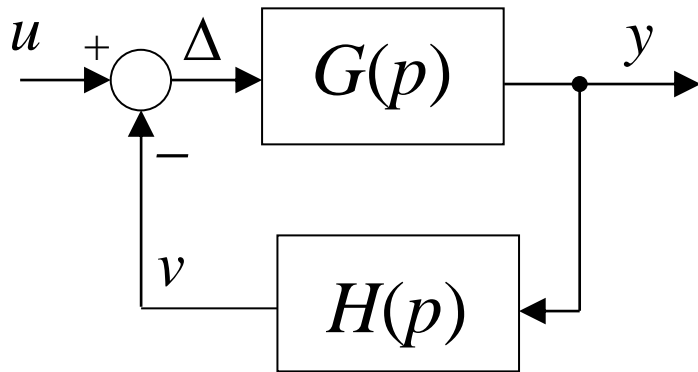
$$= \frac{K \cdot p \cdot T_i (1 + p \cdot T_g) + (1 + p \cdot T_g) + p^2 \cdot T_D T_i}{p \cdot T_i (1 + p \cdot T_g)}$$

$$\frac{y}{e}(p) = \frac{1 + p \cdot (K T_i + T_g) + p^2 \cdot T_n (T_g + T_d)}{p \cdot T_i (1 + p T_g)} \approx K \frac{(1 + p \cdot T_n)(1 + p \cdot T_d)}{p \cdot T_n (1 + p \cdot T_g)}$$

$$T_n \gg T_d \gg T_g$$



Sistem sa povratnom vezom- opšti slučaj



$$\Delta = u - v \quad v = H(p) \cdot y$$

$$y = G(p) \cdot \Delta$$

$$y = G(p) \cdot (u - v) = G(p) \cdot [u - H(p) \cdot y]$$

$$y + G(p) \cdot H(p) \cdot y = G(p) \cdot u$$

$$\frac{y}{u}(p) = \frac{G(p)}{1 + G(p) \cdot H(p)}$$

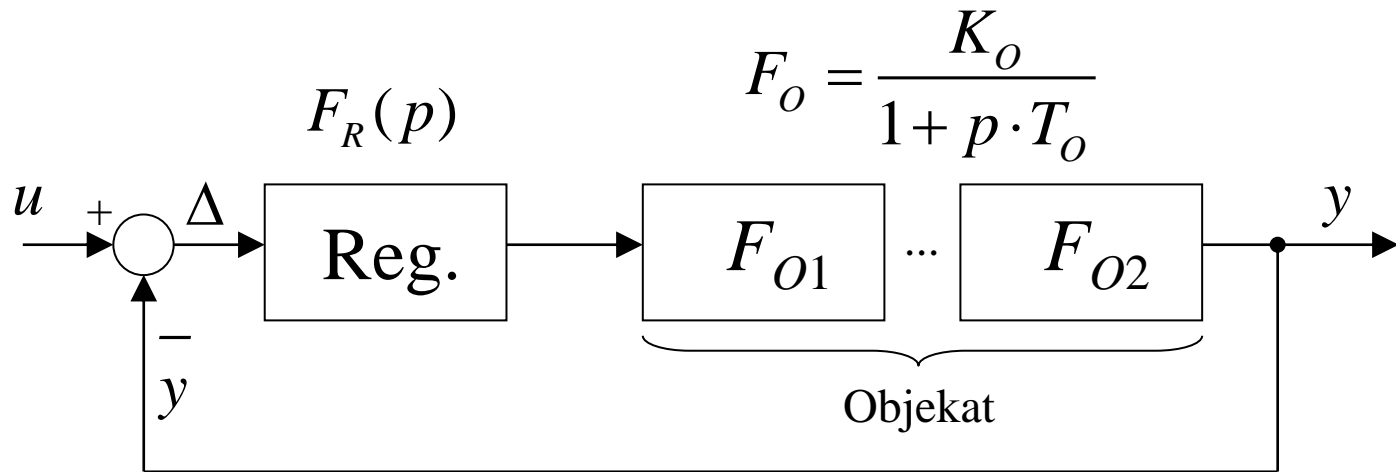
$$y(p) = \frac{G(p)}{1 + G(p) \cdot H(p)} \cdot u(p)$$

Ako je $H(p)=1$:

$$G(p) = F_0(p) = \frac{y}{\Delta}(p)$$

$$\frac{y}{u}(p) = F_w(p) = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)}$$

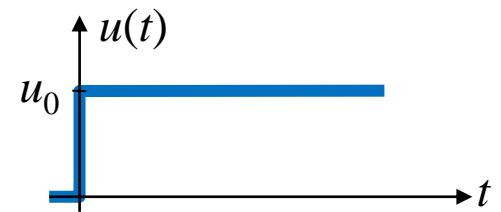
Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom



Posmatraćemo P, I, PI, D i PD regulatore za slučaj:

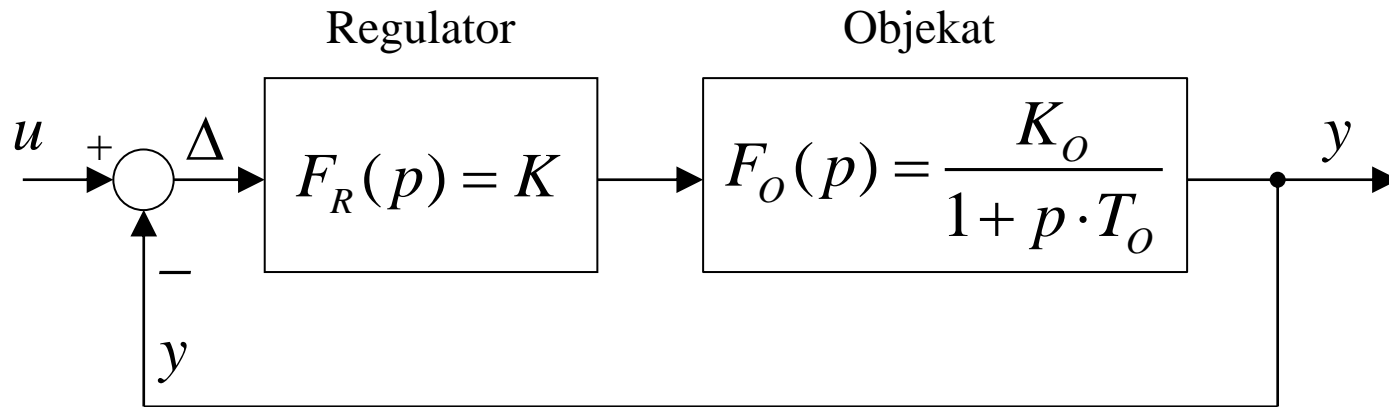
$$u(t) = u_0 \cdot h(t)$$

$$u(p) = \frac{u_0}{p}$$



Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

P



Pojačanje u direktnoj grani

$$F_o(p) = F_R(p) \cdot F_o(p)$$

Pojačanje u povratnoj sprezi

$$H(p) = 1$$

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

$$\mathbf{P} \quad F_w(p) = \frac{K \cdot F_o}{1 + K \cdot F_o} = \frac{K \cdot \left(\frac{K_o}{1 + pT_o} \right)}{1 + K \cdot \left(\frac{K_o}{1 + pT_o} \right)} = \frac{K \cdot K_o}{pT_o + 1 + K \cdot K_o}$$

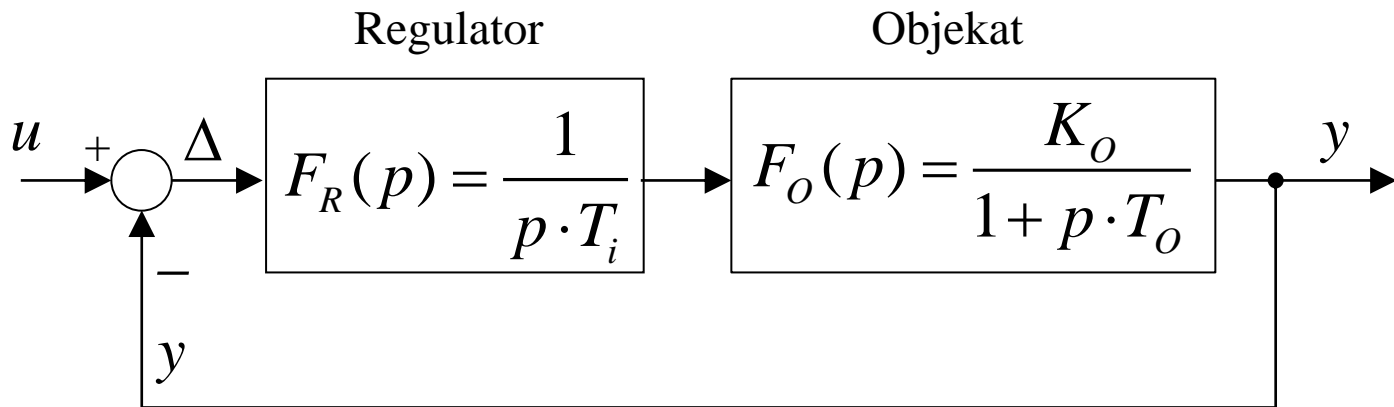
U stacionarnom stanju $p = 0$ $F_w(0) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K \cdot K_o}} \neq 1$

Ima statičku grešku!

$$y(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} \left[p \cdot F_w(p) \cdot \frac{u_0}{p} \right] = F_w(0) \cdot u_0 \neq u_0$$

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

I



Pojačanje u direktnoj grani $F_0(p) = F_R(p) \cdot F_O(p) = \frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_o}{1 + p \cdot T_o}$

Pojačanje u povratnoj sprezi $H(p) = 1$

$$F_w(p) = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)} = \frac{\frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_o}{1 + p \cdot T_o}}{1 + \frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_o}{1 + p \cdot T_o}}$$

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

I

$$F_w(p) = \frac{K_o}{p \cdot T_i(1 + p \cdot T_o) + K_o} = \frac{K_o}{p^2 \cdot T_i \cdot T_o + p \cdot T_i + K_o}$$

U stacionarnom stanju $p = 0$ $F_w(0) = 1$

Nema statičku grešku!

$$y(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} \left[p \cdot F_w(p) \cdot \frac{u_0}{p} \right] = F_w(0) \cdot u_0 = u_0$$

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

PI

$$F_o(p) = K \cdot \frac{1 + p \cdot T_n}{p \cdot T_n} \cdot \frac{K_o}{1 + p \cdot T_o}$$

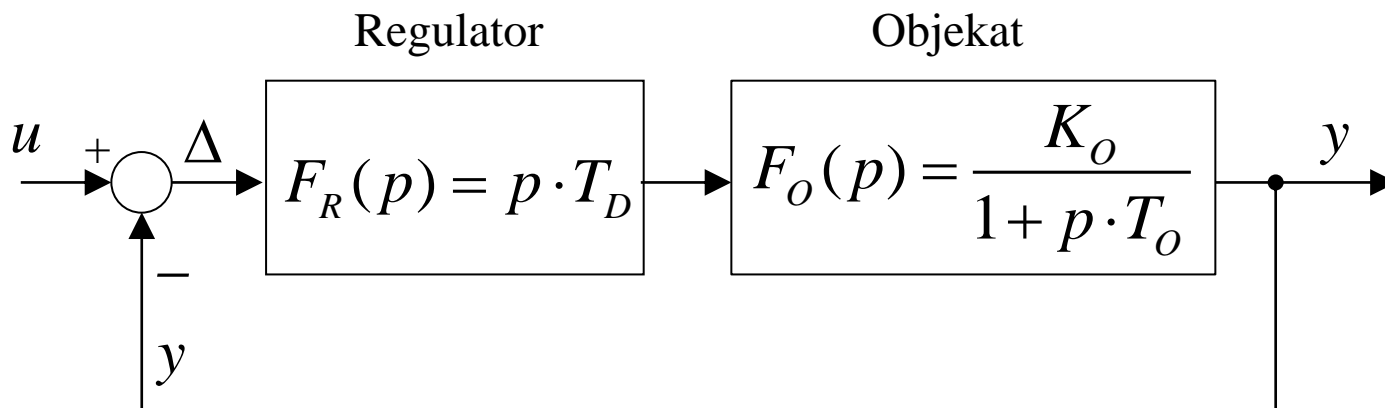
$$F_w(p) = \frac{K \cdot K_o (1 + p \cdot T_n)}{p^2 \cdot T_n \cdot T_o + p \cdot T_n (1 + K \cdot K_o) + K \cdot K_o}$$

U stacionarnom stanju $p = 0$ $F_w(0) = \frac{K \cdot K_o}{K \cdot K_o} = 1$

Nema statičku grešku!

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

D



Pojačanje u direktnoj grani $F_0(p) = F_R(p) \cdot F_O(p) = p \cdot T_D \cdot \frac{K_O}{1 + p \cdot T_O}$

Pojačanje u povratnoj sprezi $H(p) = 1$

$$F_w(p) = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)} = \frac{p \cdot T_D \cdot \frac{K_O}{1 + p \cdot T_O}}{1 + p \cdot T_D \cdot \frac{K_O}{1 + p \cdot T_O}}$$

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

D

$$F_w(p) = \frac{p \cdot T_D \cdot K_O}{1 + p \cdot T_O + p \cdot T_D \cdot K_O} = \frac{p \cdot T_D \cdot K_O}{1 + p \cdot (T_O + T_D \cdot K_O)}$$

U stacionarnom stanju $p = 0$

$$F_w(0) = 0 \neq 1 \quad \text{Ima statičku grešku!}$$

Diferencijalni tip regulatora propušta samo promenu signala.
Gubi se konstantna (jednosmerna) komponenta signala.

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

PD

$$F_o(p) = K \frac{1 + p \cdot T_d}{1 + p \cdot T_g} \cdot \frac{K_o}{1 + p \cdot T_o}$$

$$F_w(p) = \frac{K \cdot K_o (1 + p \cdot T_d)}{p^2 \cdot T_o \cdot T_g + p \cdot (T_g + T_o + K \cdot K_o \cdot T_d) + K \cdot K_o + 1}$$

U stacionarnom stanju $p = 0$

$$F_w(0) = \frac{K \cdot K_o}{K \cdot K_o + 1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K \cdot K_o}} \neq 1$$

Ima statičku grešku!

Statička greška je ista kao kod P regulatora.

Ponašanje regulatora u sistemu sa povratnom vezom

U slučaju impulsnog ulaza – nema statičke greške u svim posmatranim slučajevima.

$$u(t) = u_0 \cdot \delta(t)$$

$$u(p) = u_0$$