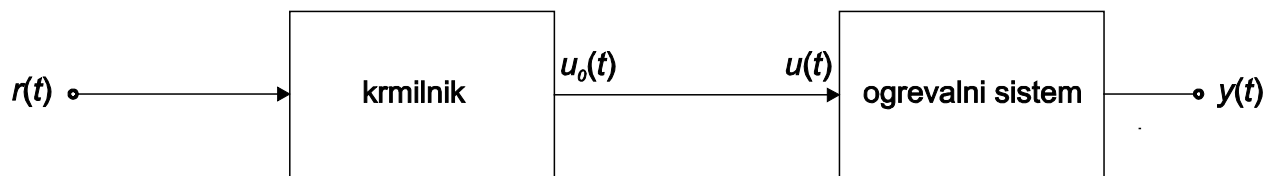


## Vodenje ogrevalnega sistema

### Odpertozančno vodenje

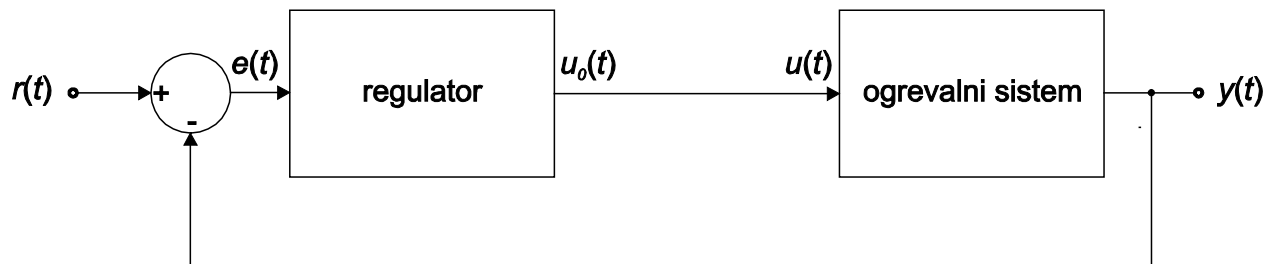
Voditi sistem pomeni vplivati nanj tako, da se obnaša kot želimo, tj. da je izhodni signal sistema  $y(t)$  čim bolj podoben referenčnemu signalu  $r(t)$ . Na obnašanje sistema oz. na potek izhodnega signala sistema  $y(t)$  lahko vplivamo preko vhodnega signala sistema  $u(t)$ . V nekaterih primerih lahko uporabimo *odprtozančni sistem vodenja*, ki ga prikazuje spodnja slika.



V tem primeru krmilnik preračuna referenčni signal  $r(t)$  v ustrezen krmilni signal  $u_0(t)$ . Vhodni signal ogrevalnega sistema  $u(t)$  je določen z izhodnim signalom krmilnika  $u_0(t)$ . Krmilnik skušamo načrtati tako, da bo krmilni signal  $u_0(t)$ , ki predstavlja hkrati tudi vhod v krmiljeni sistem  $u(t)$ , zagotovil, da je izhod krmiljenega sistema  $y(t)$  (bolj ali manj) primerljiv z referenčnim signalom  $r(t)$ .

### Zaprtozančno vodenje

Sistemu odprtozančnega vodenja za točnejše in prilagodljivejše delovanje manjka povratna zanka, tj. uporaba informacije o izhodnem signalu  $y(t)$ . Če to informacijo uporabimo za vodenje, dobimo *zaprtozančni sistem vodenja* ali z *regulacijski sistem*.



Regulacijski sistem primerja *regulirano veličino*  $y(t)$  z referenco  $r(t)$ . Regulator določi ustrezno *regulirano veličino*  $u_0(t)$  na podlagi *pogreška*  $e(t)$ , tj. razlike med *referenco*  $r(t)$  in *regulirano veličino*  $y(t)$ , kot jo določa spodnja enačba.

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

**P-regulator**

Regulator skušamo načrtati tako, da zmanjšuje pogrešek  $e(t)$ . V našem primeru bomo za vodenje uporabili *proporcionalni regulator (P-regulator)*. Izhodni signal P-regulatorja določa spodnja enačba.

$$u_0(t) = K_P \cdot e(t)$$

Parameter  $K_P$  označuje *ojačenje* P-regulatorja.

Preidimo v laplaceov prostor. Zapišemo lahko prenosno funkcijo regulatorja.

$$G_R(s) = \frac{U_0(s)}{E(s)} = K_P$$

Prenosna funkcija ogrevalnega sistema je zapisana spodaj.

$$G_{OS}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Kakšen je odziv P-regulatorja na stopničast vhodni signal?

**Sledilno delovanje s P-regulatorjem**

Ko načrtujemo regulacijski sistem za sledilno delovanje, je poudarek na tem, da regulirana veličina  $y(t)$  čim bolj sledi referenci  $r(t)$ .

Z upoštevanjem prejšnjih enačb lahko zapišemo prenosno funkcijo zaprtozančnega sistema.

$$G_{ZZ}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p K}{K_p K + 1}}{\frac{T}{K_p K + 1} s + 1}$$

Izkaže se, da je tudi zaprtozančna prenosna funkcija določa sistem 1. reda. Ojačenje  $K_{ZZ}$  in časovna konstanta  $T_{ZZ}$  zaprtozančnega sistema sta zapisana spodaj.

$$K_{ZZ} = \frac{K_p K}{K_p K + 1}$$

$$T_{ZZ} = \frac{T}{K_p K + 1}$$

Iz želenih lastnosti zaprtozančnega sistema (iz ojačenja  $K_{ZZ}$  oz. časovne konstante  $T_{ZZ}$ ) lahko določimo ustrezní P-regulator, tj. parameter  $K_p$ .

$$a) K_p = \frac{K_{ZZ}}{K(1 - K_{ZZ})}$$

$$b) K_p = \frac{T - T_{ZZ}}{T_{ZZ} K}$$

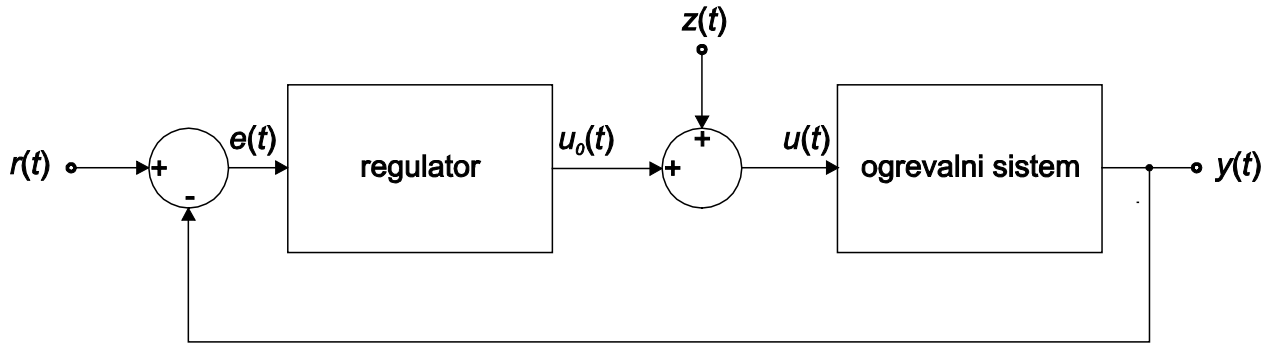
Predpišimo, naj bo zaprtozančni sistem 10-krat hitrejši od odprtozančnega. Določite ustrezní prenosni funkciji regulatorja in zaprtozančnega sistema. Simulirajte odziv zaprtozančnega sistema (z začetnim stanjem  $T_n(0) = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) na stopničast referenčni signal  $r(t)$ , ki je podan spodaj.

$$r(t) = \begin{cases} 0 & ; t < 10000 \text{ s} \\ 10 & ; t \geq 10000 \text{ s} \end{cases}$$

Primerjajte odziv z odprtozančnim delovanjem in komentirajte bistvene razlike. Ali se rezultati simulacije ujemajo s teoretičnimi rezultati (obravnavajte poteke signalov, časovne konstante, ojačenje, pogrešek v ustaljenem stanju)?

**Regulacijsko delovanje s P-regulatorjem**

Ko načrtujemo regulacijski sistem za regulacijsko delovanje, je poudarek na učinkovitem odpravljanju motenj. Predpostavimo, da je na vходу reguliranega sistema prisotna motnja  $z(t)$  – glejte spodnjo simulacijsko shemo.



Vhodni signal ogrevalnega sistema  $u(t)$  je vsota izhodnega signala regulatorja  $u_0(t)$  in motnje  $z_{vh}(t)$ .

$$u(t) = u_0(t) + z_{vh}(t)$$

Preidimo v laplaceov prostor. Če predpostavimo, da je referenčni signal  $r(t) = 0$ , lahko izpeljemo prenosno funkcijo med motnjo in izhodom sistema.

$$G_M(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{\frac{K}{K_p K + 1}}{\frac{T}{K_p K + 1} s + 1}$$

Izkaže se, da prenosna funkcija med motnjo in izhodom sistema določa sistem 1. reda. Ojačenje  $K_M$  in časovna konstanta  $T_M$  sta zapisana spodaj.

$$K_M = \frac{K}{1 + K_p K}$$

$$T_M = \frac{T}{1 + K_p K}$$

Uporabite isti regulator kot pri sledilnem delovanju in simulirajte odziv ogrevalnega sistema (z začetnim stanjem  $T_n(0) = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) na motnjo na vходу, ki je podana v spodnjem izrazu.

$$z(t) = \begin{cases} 0 & ; t < 10000 \text{ s} \\ 250 & ; t \geq 10000 \text{ s} \end{cases}$$

Primerjajte odziv z odprtozančnim delovanjem in komentirajte bistvene razlike. Ali se rezultati simulacije ujemajo s teoretičnimi rezultati (obravnavajte poteke signalov, časovne konstante, ojačenje, pogrešek v ustaljenem stanju)?

### PI-regulator

V prejšnji vaji smo preverili delovanje najpreprostejšega linearnega regulatorja, tj. P-regulatorja. Preverili smo sledilno in regulacijsko delovanje. V obeh primerih smo ugotovili, da zaprtozančni sistem vodenja izboljša delovanje v primerjavi z odprtozančnim sistemom, kljub temu pa nam P-regulator ne more zagotoviti delovanja brez pogreška v ustaljenem stanju. Kako vpliva nastavitvev ojačenja P-regulatorja  $K_P$  na pogrešek v ustaljenem stanju?

Pogrešek v ustaljenem stanju pri odzivu sistema vodenja na stopničasto spremembo oz. na stopničasto motnjo na vhodu bomo skušali odpraviti s spremembo strukture regulatorja: P-regulatorju dodamo integrirni člen in dobimo *proporcionalno-integrirni regulator (PI-regulator)*. Izhodni signal PI-regulatorja določa spodnja enačba.

$$u_0(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) dt$$

Parameter  $K_P$  označuje *ojačenje proporcionalnega člena*,  $K_I$  pa *ojačenje integrirnega člena* PI-regulatorja.

Preidimo v laplaceov prostor. Zapišemo lahko prenosno funkcijo regulatorja.

$$G_R(s) = \frac{U_0(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s}$$

Prenosna funkcija ogrevalnega sistema je zapisana spodaj.

$$G_{OS}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Kakšen je odziv PI-regulatorja na stopničast vhodni signal?

### Sledilno delovanje s PI-regulatorjem

Ko načrtujemo regulacijski sistem za sledilno delovanje, je poudarek na tem, da regulirana veličina  $y(t)$  čim bolj sledi referenci  $r(t)$ .

Z upoštevanjem prejšnjih enačb lahko zapišemo prenosno funkcijo zaprtozančnega sistema.

$$G_{ZZ}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_P K}{T} s + \frac{K_I K}{T}}{s^2 + \left(\frac{K_P K + 1}{T}\right) s + \frac{K_I K}{T}}$$

AVTOMATSKO VODENJE SISTEMOV  
Laboratorijske vaje

Izkaže se, da je splošna zaprtozančna prenosna funkcija določa sistem 2. reda, ki je nekoliko zahtevnejši za obravnavo od sistema 1. reda, ki ga določa zaprtozančna prenosna funkcija v primeru uporabe P-regulatorja. Kljub temu lahko dinamiko zaprtozančnega sistema poenostavimo: izberemo tako ničlo regulatorja ( $s = -\frac{K_I}{K_P}$ ), da krajša pol vodenega sistema ( $s = -\frac{1}{T}$ ). V tem primeru je ojačenje integrirnega člena regulatorja določeno v spodnji enačbi.

$$K_I = \frac{K_P}{T}$$

Poenostavljeno zaprtozančno prenosno funkcijo podaja spodnja enačba.

$$G_{ZZ}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{\frac{T}{K_P K} s + 1}$$

Izkaže se, da v tem primeru zaprtozančna prenosna funkcija določa sistem 1. reda. Ojačenje  $K_{ZZ}$  in časovna konstanta  $T_{ZZ}$  zaprtozančnega sistema sta zapisana spodaj.

$$K_{ZZ} = 1$$

$$T_{ZZ} = \frac{T}{K_P K}$$

Iz želenih lastnosti zaprtozančnega sistema (iz časovne konstante  $T_{ZZ}$ ) lahko določimo ustrezni PI-regulator, tj. parameter  $K_P$ . Parameter  $K_I$  je že določen v zgornji enačbi.

$$K_P = \frac{T}{T_{ZZ} K}$$

Primerjajte prenosni funkciji zaprtozančnega sistema za sledilno delovanje pri uporabi P-regulatorja in PI-regulatorja. Kje se kaže bistvena izboljšava PI-regulatorja?

Predpišimo, naj bo zaprtozančni sistem 10-krat hitrejši od odprtozančnega. Določite ustrezni prenosni funkciji regulatorja in zaprtozančnega sistema. Simulirajte odziv zaprtozančnega sistema (z začetnim stanjem  $T_n(0) = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) na stopničast referenčni signal  $r(t)$ , ki je podan spodaj.

$$r(t) = \begin{cases} 0 & ; t < 10000 \text{ s} \\ 10 & ; t \geq 10000 \text{ s} \end{cases}$$

Primerjajte odziv z odprtozančnim delovanjem in komentirajte bistvene razlike. Ali se rezultati simulacije ujemajo s teoretičnimi rezultati (obravnavajte poteke signalov, časovne konstante, ojačenje, pogrešek v ustaljenem stanju)?

**Regulacijsko delovanje s PI-regulatorjem**

Ko načrtujemo regulacijski sistem za regulacijsko delovanje, je poudarek na učinkovitem odpravljanju motenj. Predpostavimo, da je na vhodu reguliranega sistema prisotna motnja  $z(t)$ .

Vhodni signal ogrevalnega sistema  $u(t)$  je vsota izhodnega signala regulatorja  $u_0(t)$  in motnje  $z_{vh}(t)$ .

$$u(t) = u_0(t) + z_{vh}(t)$$

Preidimo v laplaceov prostor. Če predpostavimo, da je referenčni signal  $r(t) = 0$ , lahko izpeljemo prenosno funkcijo med motnjo in izhodom sistema.

$$G_M(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{\frac{K}{T}s}{s^2 + \left(\frac{K_P K + 1}{T}\right)s + \frac{K_I K}{T}}$$

Izkaže se, da je zaprtzančna prenosna funkcija določa sistem 2. reda.

Ojačenje zaprtzančnega sistema  $K_M$  lahko izpeljemo iz teorema laplaceove transformacije o končni vrednosti.

$$K_M = \lim_{s \rightarrow 0} G_M(s) = 0$$

Primerjajte prenosni funkciji zaprtzančnega sistema za regulacijsko delovanje pri uporabi P-regulatorja in PI-regulatorja. Kje se kaže bistvena izboljšava PI-regulatorja?

Uporabite isti regulator kot pri sledilnem delovanju in simulirajte odziv ogrevalnega sistema (z začetnim stanjem  $T_n(0) = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) na motnjo na vhodu, ki je podana v spodnjem izrazu.

$$z(t) = \begin{cases} 0 & ; t < 10000 \text{ s} \\ 250 & ; t \geq 10000 \text{ s} \end{cases}$$

Primerjajte odziv z odprtozančnim delovanjem in komentirajte bistvene razlike. Ali se rezultati simulacije ujemajo s teoretičnimi rezultati (obravnavajte poteke signalov, ojačenje, pogrešek v ustaljenem stanju)?