

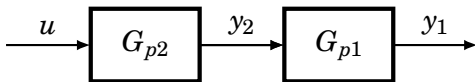
Regulatorstrukturer

- ▶ Kaskadreglering (*cascade control*)
- ▶ Mitthållning (*mid-range control*)
- ▶ Kvotreglering (*ratio control*)
- ▶ Framkoppling (*feedforward*)
- ▶ Dödtidskompensering (*delay compensation*)

Läsansivning: *Process Control*: 9.1–9.6

Kaskadreglering

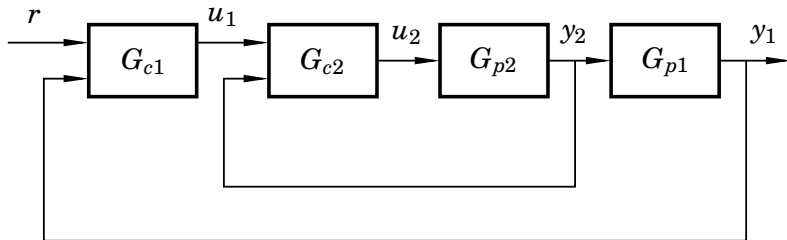
Kaskadreglering kan användas för system som kan delas upp:



där både y_2 och y_1 kan mätas och G_{p2} är (eller kan göras) minst 10 gånger snabbare än G_{p1}

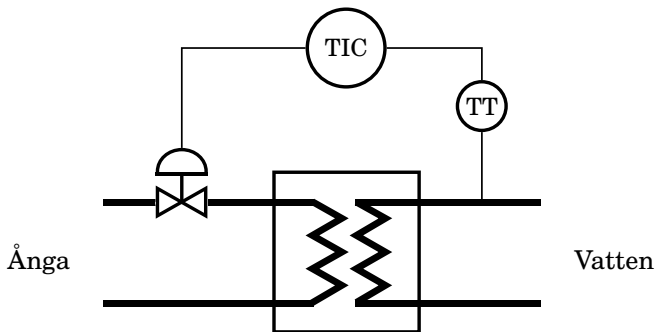
Exempel: $G_{p1} = \frac{K_1}{1 + T_1 s}$ och $G_{p2} = \frac{K_2}{1 + T_2 s}$ där $T_2 < 0.1 T_1$

Kaskadreglering – blockschema



- ▶ Sekundärregulatorn G_{c2} reglerar y_2
 - ▶ Inre loopen är snabb i förhållande till yttre loopen
 - ▶ Ofta med P-regulator med hög förstärkning
 - ▶ För den långsammare yttre loopen så är $y_2 \approx u_1$
- ▶ Primärregulatorn G_{c1} reglerar y_1
 - ▶ Ofta PI- eller PID-regulator

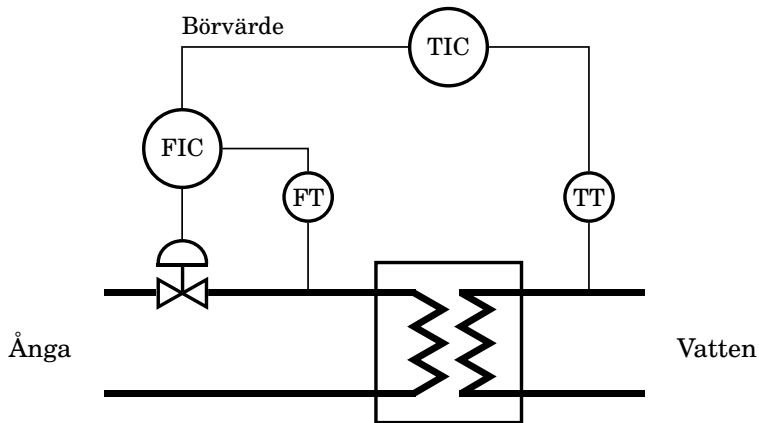
Exempel: värmeväxlare



Regleringen kan fungera dåligt om t.ex.

- ▶ ventilen är olinjär
- ▶ ångtrycket på primärsidan varierar (laststörning)

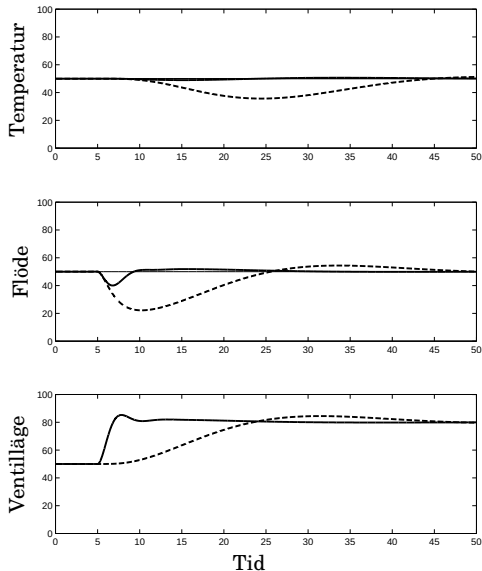
Exempel: värmeväxlare med kaskadreglering



- ▶ Den inre reglerkretsen ser till att ångflödet regleras
- ▶ Börvärdet till flödesregulatorn ges av styrsignalen från temperaturregulatorn

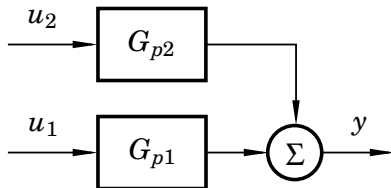
Exempel: värmeväxlare – simulering

Med kaskadreglering (heldragen) och utan (streckad); störning vid $t = 5$:



Mitthållning

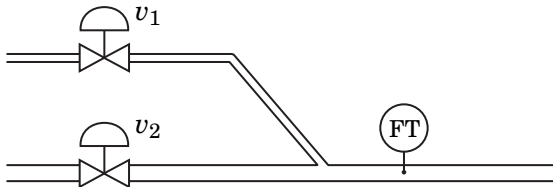
Användbart för processer med två styrsignaler och en mätsignal, t.ex.



- ▶ u_1 hög precision men litet arbetsområde
- ▶ u_2 låg precision men stort arbetsområde

Mitthållning – exempel

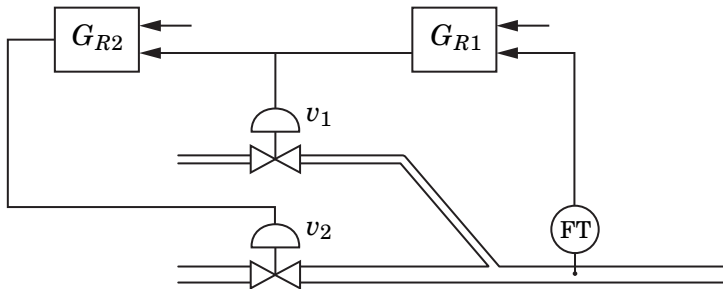
Flödesreglering med två styrventiler:



- ▶ Ventilen v_1 är liten och har stor noggrannhet
 - ▶ stor risk för mättning
- ▶ Ventilen v_2 är stor men har sämre noggrannhet
- ▶ Hur låta dem samarbeta på bästa sätt?

Mitthållning – exempel

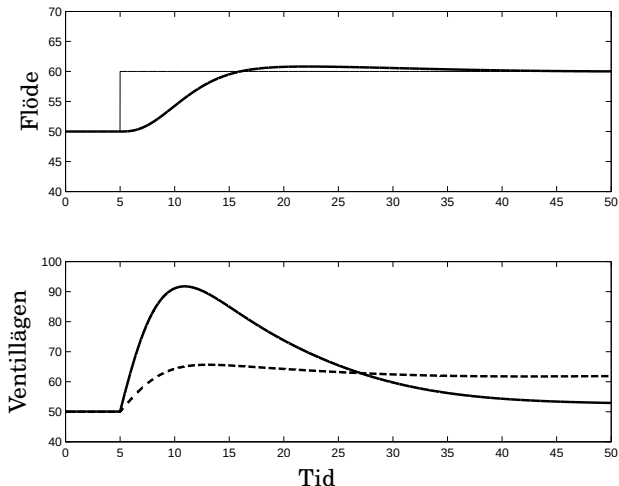
Mitthållning:



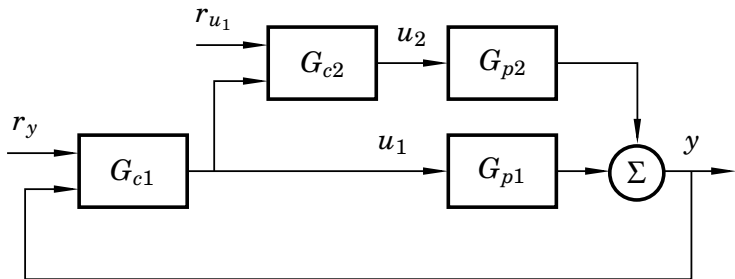
- ▶ Snabb regulator G_{R1} reglerar flödet med lilla ventilen v_1
- ▶ Långsam regulator G_{R2} justerar stora ventilen v_2 så att v_1 hålls i mitten av sitt arbetsområde

Mitthållning – simulering

Stora ventilen (streckad) håller lilla ventilen (heldragen) vid 50%



Mitthållning – blockschema

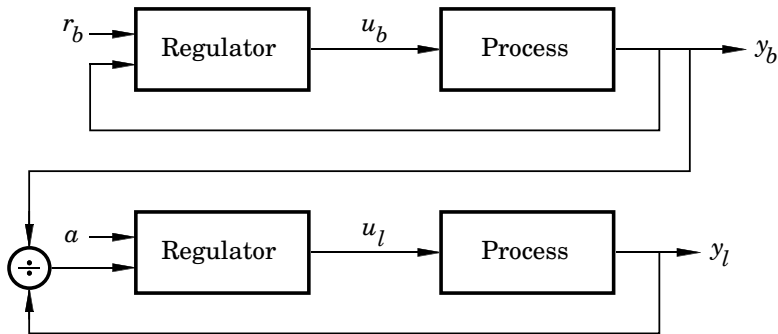


- ▶ G_{c1} och G_{p1} bildar snabb och noggrann reglerkrets
- ▶ Styrsignalen från G_{c1} fungerar som mätsignal till G_{c2}
 - ▶ r_{u_1} väljs till mitten av u_1 :s arbetsområde
- ▶ G_{c2} har låg förstärkning, ev. enbart I-del
 - ▶ Tumregel: minst 10 ggr större tidskonstant än snabba kretsen

Kvotreglering

Exempel: hålla konstant luft/bränsle-förhållande

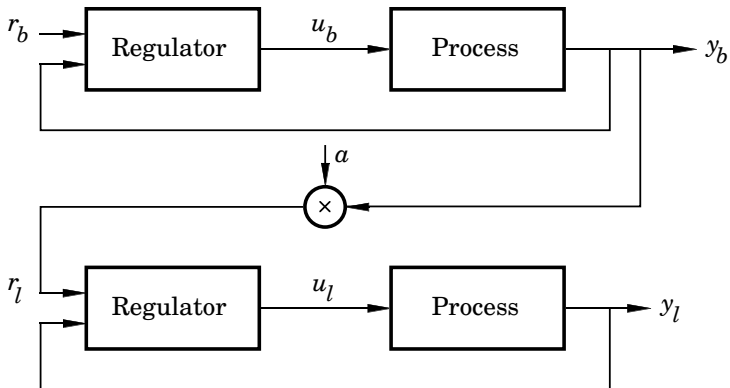
Antag att vi vill ha $y_l/y_b = \alpha$. Naiv lösning (reglera kvoten α direkt):



Olinjärt, förstärkningen i andra kretsen varierar med y_b

Kvotreglering

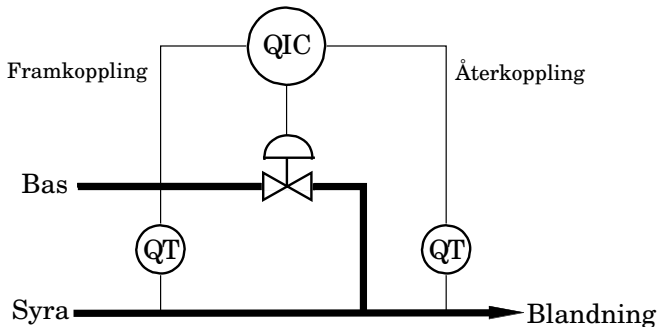
Bättre lösning:



- ▶ Börvärdet på flödet går till första kretsen som antas långsam
- ▶ Andra kretsen görs snabb och upprätthåller önskad kvot

Framkoppling – exempel

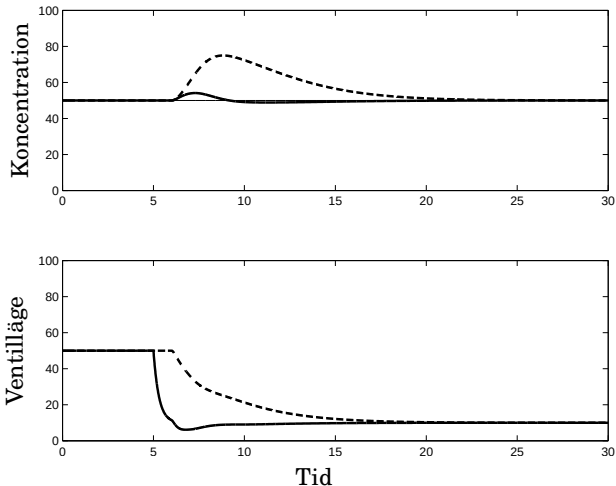
Exempel: koncentrationsreglering



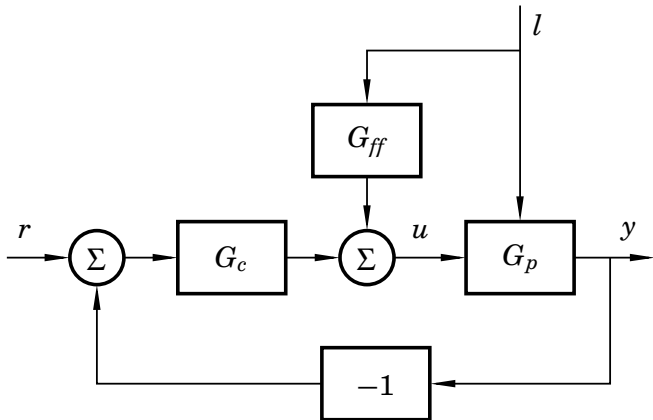
- Framkopplingen kan kompensera för plötsliga ändringar i syrakoncentrationen

Framkoppling – simulering av exempel

Med framkoppling (heldragen) och utan (streckad); störning vid $t = 5$:



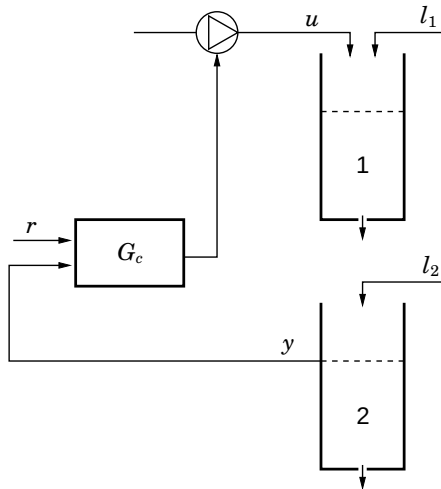
Framkoppling – blockschema



Hur välja kompensatorn $G_{ff}(s)$? Beror på var i processen störningen l kommer in.

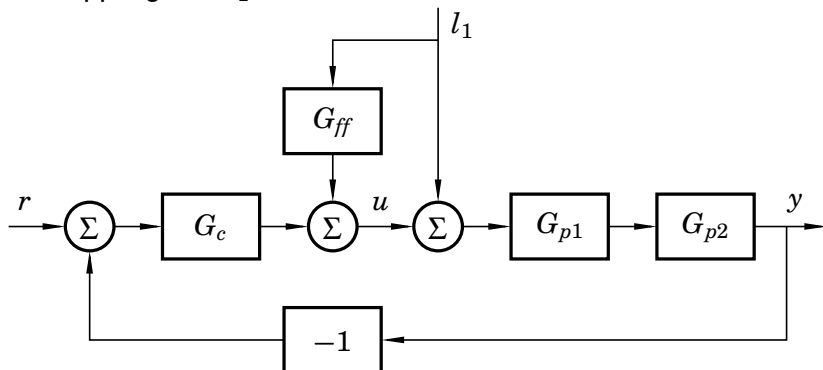
Framkoppling – tank eksempel

Reglering av undre tanken



Framkoppling – tankexempel

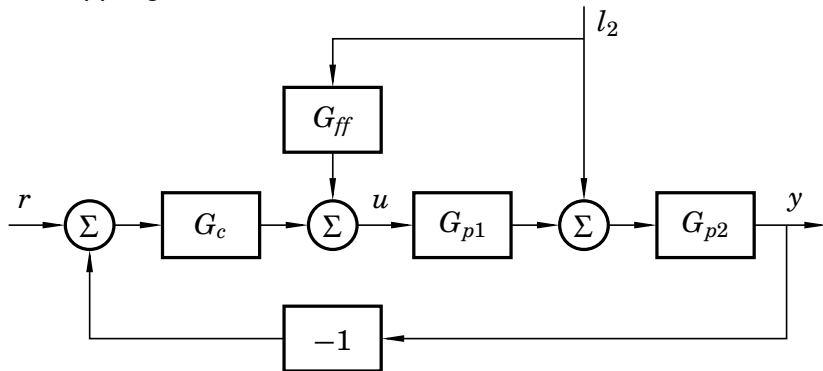
Framkoppling från l_1 :



Välj $G_{ff}(s) = -1$ för att eliminera inverkan av störningen

Framkoppling – tankexempel

Framkoppling från l_2 :



Välj $G_{ff}(s) = -\frac{1}{G_{P1}}$ för att eliminera inverkan av störningen

Implementering av framkoppling

Inversen $\frac{1}{G_{p1}(s)}$ kan vara problematisk att implementera

Exempel:

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{1 + sT} e^{-sL}$$

$$\frac{1}{G_{p1}(s)} = (1 + sT) e^{sL} \quad (\text{derivering och neg. tidsfördröjn.})$$

Vanliga lösningar:

- ▶ Inför lågpassfilter (jmf D-delen i PID-regulatorn), approximera bort negativa tidsfördröjningar
- ▶ Implementera bara den statiska förstärkningen

Dödtidskompensering

Exempel på dödtidsprocess:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL}$$

Svårreglerad om $L > T$ (dödtidsdominerad)

Frekvensanalys:

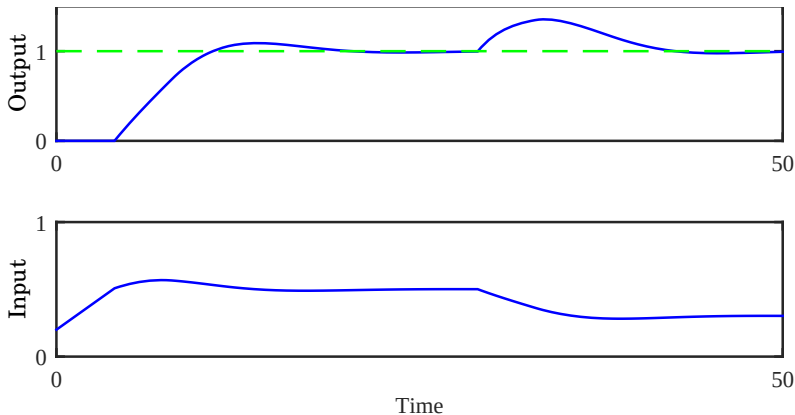
$$\begin{aligned} G_p(s) &= G_{p0}(s) e^{-sL} \\ |G_p(i\omega_c)| &= |G_{p0}(i\omega_c)| \\ \arg G_p(i\omega_c) &= \arg G_{p0}(i\omega_c) - \omega_c L \end{aligned}$$

Ju större L , desto mindre fasmarginal

Exempel: Reglering av pappersmaskin

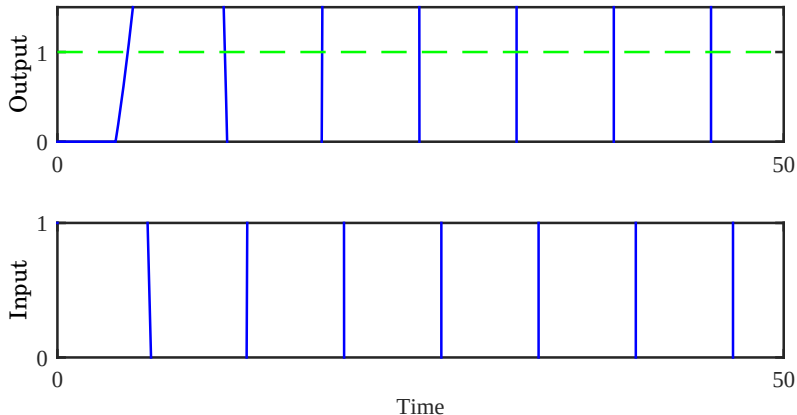
$$G_p(s) = \frac{2}{1 + 2s} e^{-4s}$$

Simulering med försiktig PI-regulator ($K = 0.2$, $T_i = 2.6$);
laststörning vid $t = 25$:

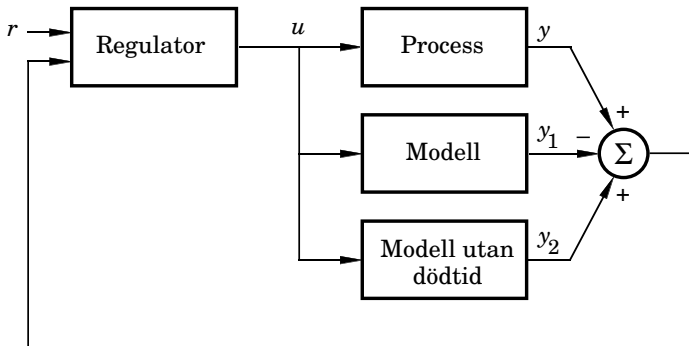


Exempel: Reglering av pappersmaskin

Simulering med mer aggressiv PI-regulator ($K = 1$, $T_i = 1$):



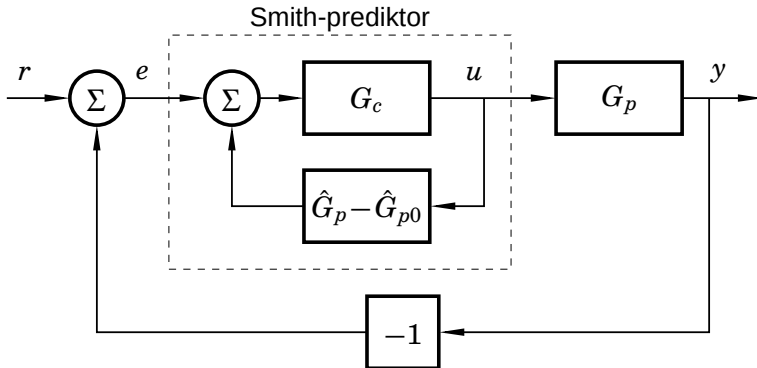
Dödtidskompensering med Smith-prediktor



Regulatorn utformas efter modellen utan dödtid. Modellen måste vara

- ▶ asymptotiskt stabil
- ▶ tillräckligt noggrann

Analys av Smith-prediktorn



- ▶ $G_p = G_{p0}e^{-sL}$ – verklig process
- ▶ $\hat{G}_p = \hat{G}_{p0}e^{-s\hat{L}}$ – modell av processen
- ▶ $\hat{G}_{p0}$ – modell av processen utan dödtid
- ▶ G_c – regulator utformad för $\hat{G}_{p0}$

Analys av Smith-prediktorn

Styrsignal:

$$U = \frac{G_c}{1 - G_c(\hat{G}_p - \hat{G}_{p0})} E$$

Slutet system:

$$Y = \frac{G_p G_c}{1 - G_c(\hat{G}_p - \hat{G}_{p0}) + G_p G_c} R$$

Antag $G_p = \hat{G}_p$ (perfekt modell):

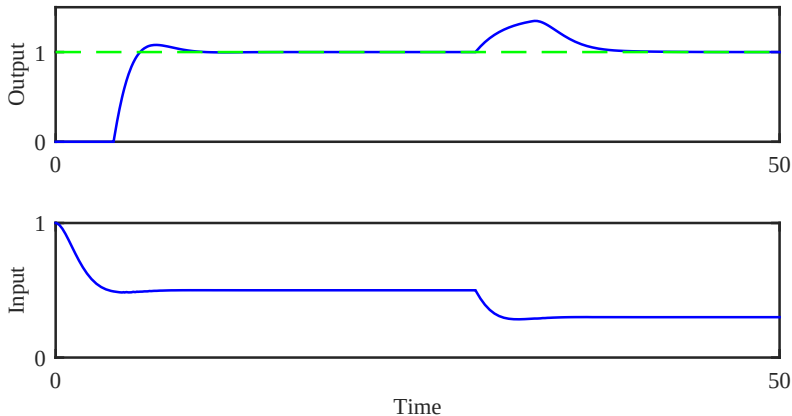
$$\begin{aligned} Y &= \frac{G_{p0} e^{-sL} G_c}{1 - G_c(G_{p0} e^{-sL} - G_{p0}) + G_{p0} e^{-sL} G_c} R \\ &= \frac{G_{p0} G_c}{1 + G_{p0} G_c} e^{-sL} R \end{aligned}$$

Som reglering av process utan död tid, fast fördröjt svar

Exempel: Reglering av pappersmaskin

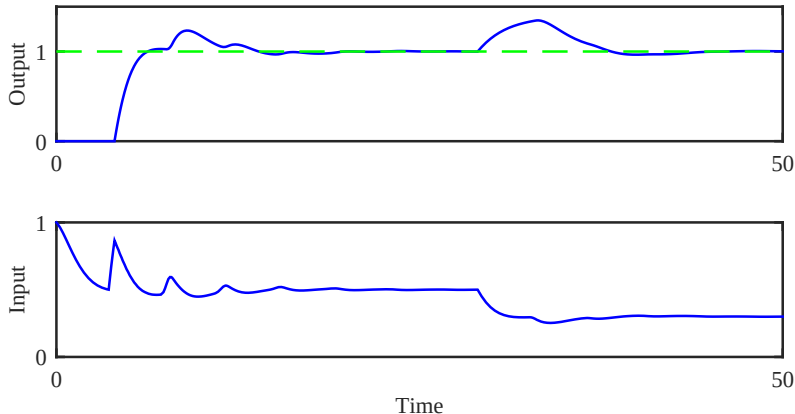
Modell utan dödtid: $G_{p0}(s) = \frac{2}{1 + 2s}$

Simulering med aggressiv PI-regulator ($K = 1$, $T_i = 1$) och Smith-prediktor med perfekt processmodell:



Exempel: Reglering av pappersmaskin

Simulering med aggressiv PI-regulator och Smith-prediktor med imperfekt processmodell ($\hat{L} = 0.9L$, $\hat{T} = 0.9T$):



Smith-prediktorn – slutsatser

- ▶ Fungerar bara för asymptotiskt stabila processer
- ▶ Fungerar bara om processmodellen är noggrann
- ▶ Regulatorn bör utformas så att slutna systemets tidskonstant inte blir mindre än processens dödtid

(Finns bättre varianter av dödtidskompensering, men de bygger alla på prediktion med hjälp av en modell)