Reguleringsteknik 1

J. Christian Andersen

Kursusuge 12

Plan

- Feed forward af input
- Feed forward af forstyrrelser
- Systemer med tidsforsinkelse

Grupperegning

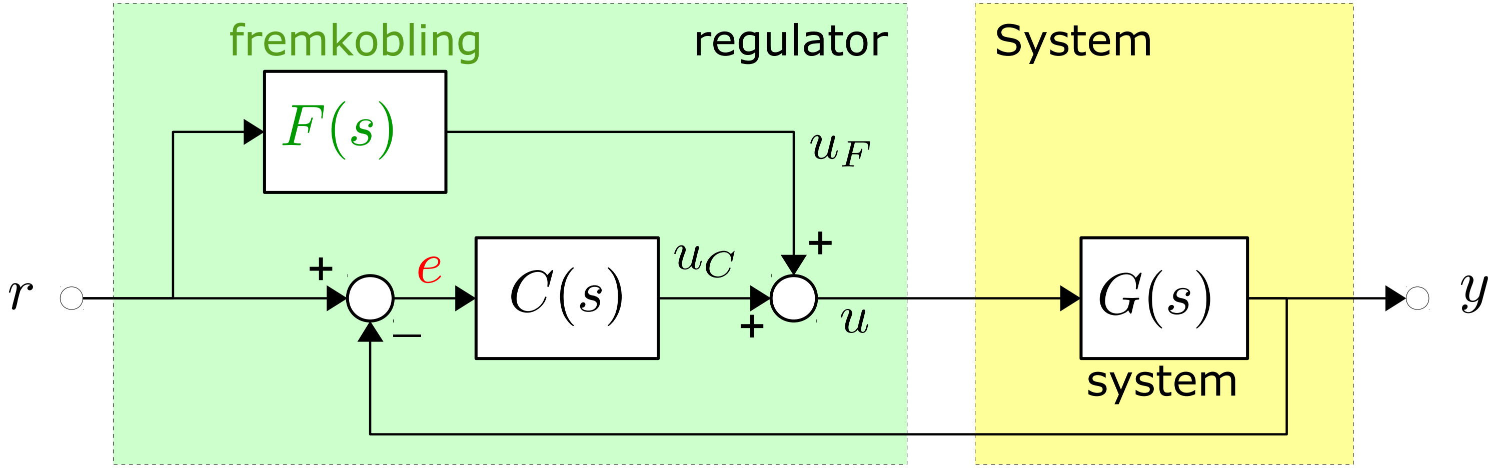
- Feed forward og delay design

Øvelse

- REGBOT balance

DTU Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Fremkobling (Feed forward)



Fejlen e er nu en sum af 3 led

$$e = r - rF(s)G(s) - eC(s)G(s)$$

$$e + eC(s)G(s) = r(1 - F(s)G(s))$$

$$e = r\frac{1 - F(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

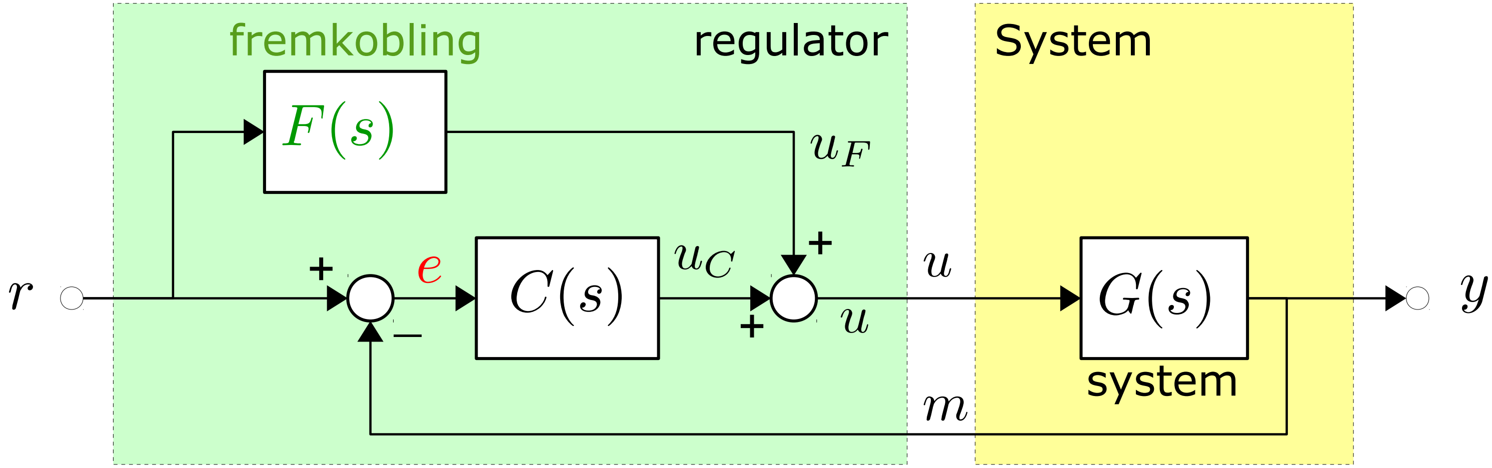
Kan $F(s)$ reducere fejlen?

$$y = r\frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} + rF(s)\frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

$$y = r\frac{F(s)G(s) + C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

$$\frac{y}{r} = \frac{F(s)G(s) + C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

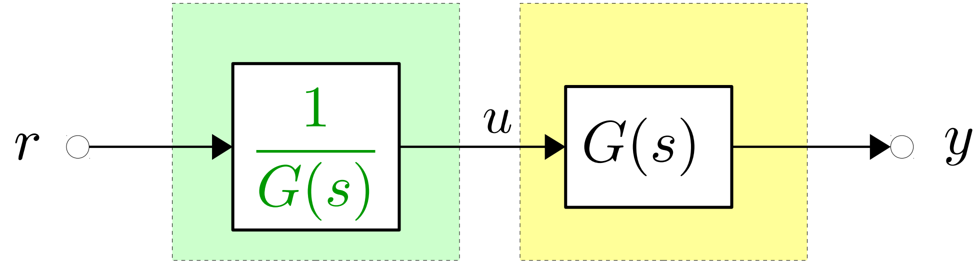
Feed forward (fremkobling)



$$e = r\frac{1 - F(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

Fejlen er 0, hvis:

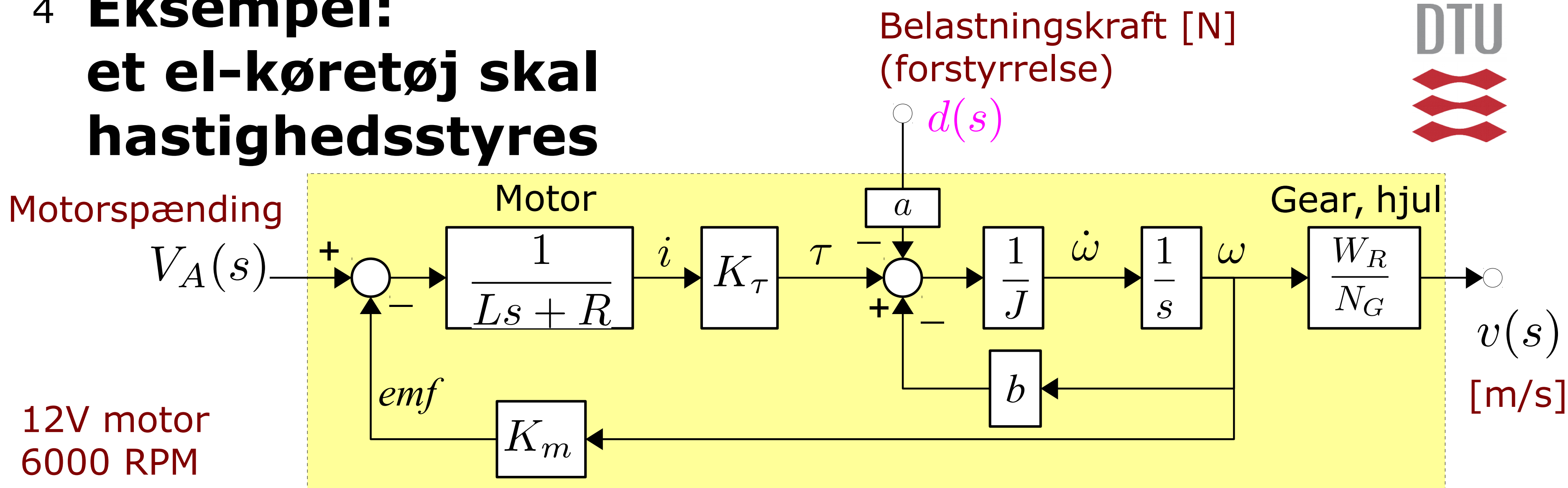
$$F(s) = \frac{1}{G(s)}$$



$$\frac{y}{r} = 1 \quad (C(s) = 0)$$

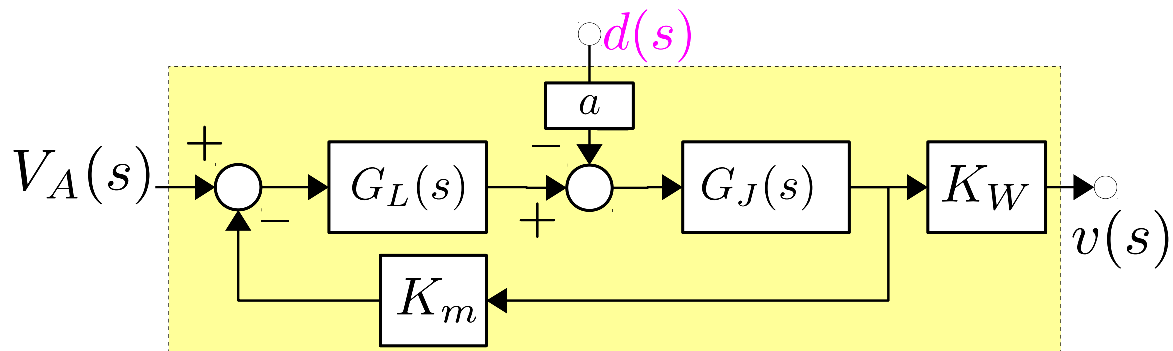
Perfekt uden regulator!
Hvor er ulemperne?

Eksempel: et el-køretøj skal hastighedsstyres



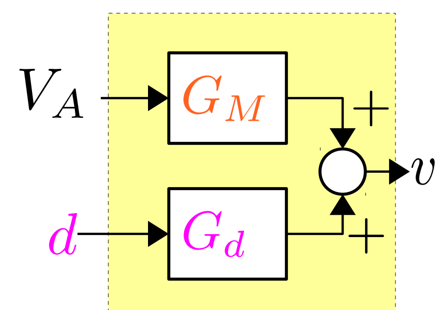
12V motor
6000 RPM

$$L = 0.05 \text{ H}$$
$$R = 2\Omega$$
$$K_\tau = 0.016 \text{ Nm/A}$$
$$K_m = 0.016 \text{ Vs}$$
$$J = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}^2$$
$$b = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}$$
$$W_R = 0.045 \text{ m}$$
$$N_G = 10$$
$$a = \frac{W_r}{N_G} \text{ m}$$



$$G_L(s) = \frac{0.016}{0.05s + 2}$$
$$G_J(s) = \frac{5 \cdot 10^4}{s + 1.25}$$

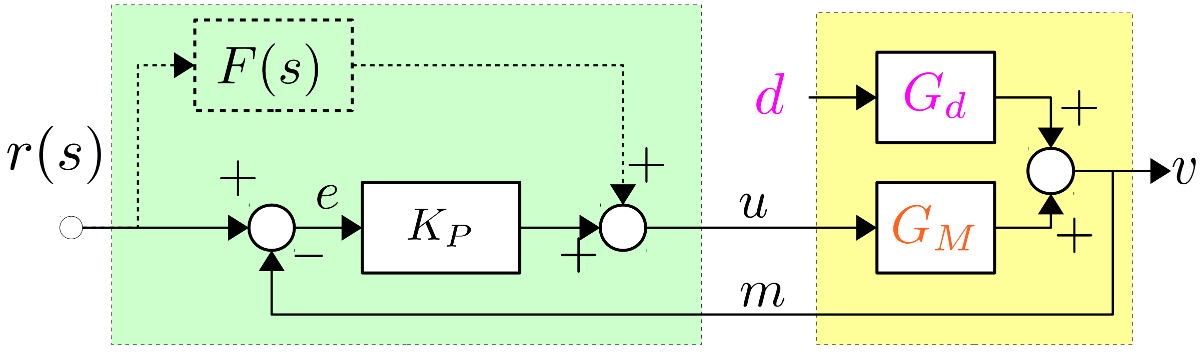
$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$
$$G_d(s) = \frac{1.01s + 40.5}{s^2 + 41.25s + 306}$$

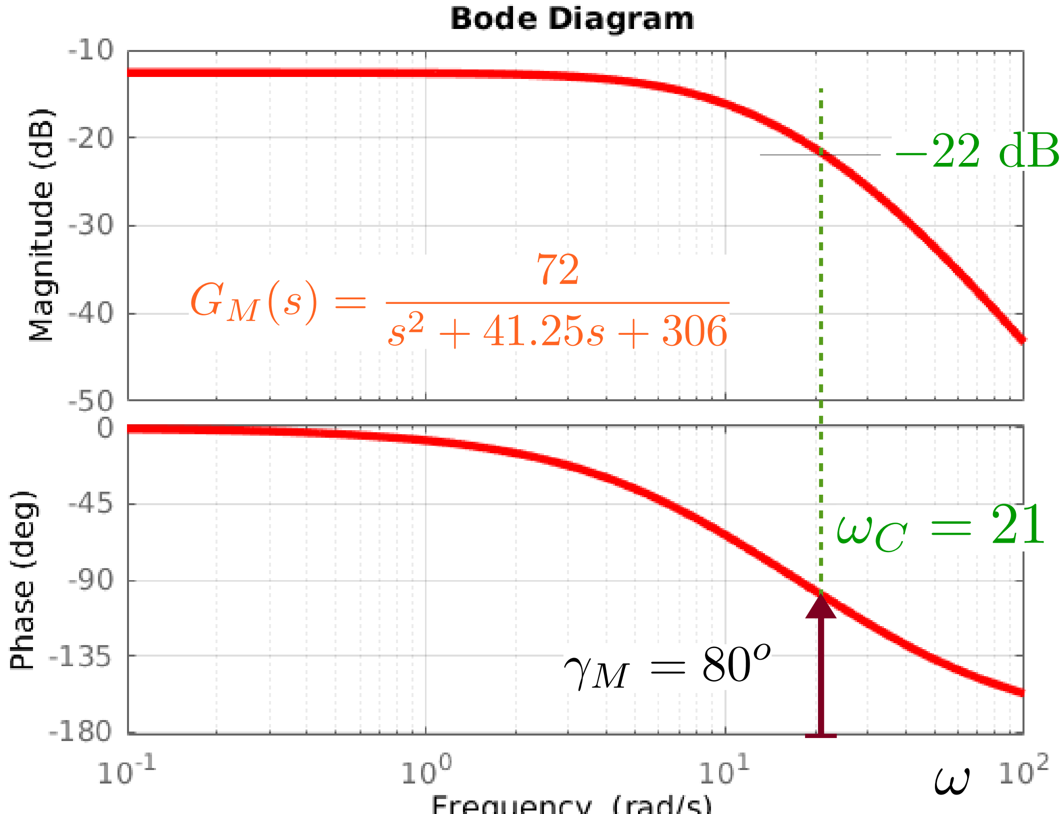


$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

$$G_d(s) = \frac{1.01s + 40.5}{s^2 + 41.25s + 306}$$

Normal regulator design (P)



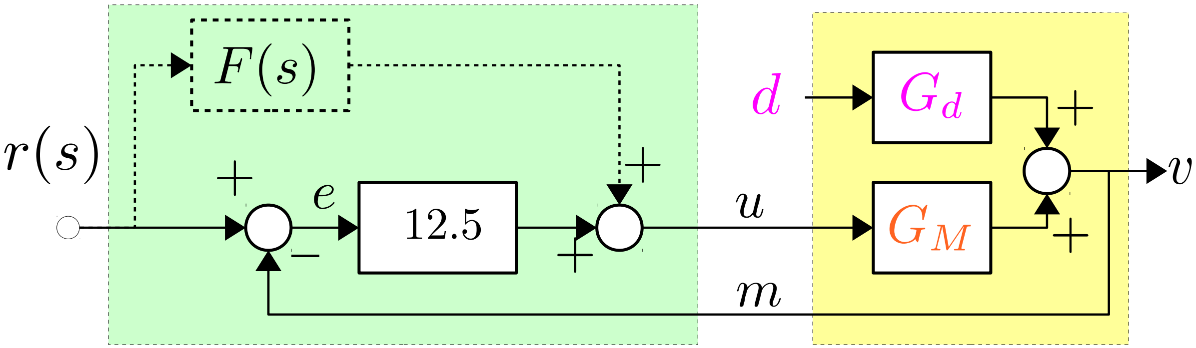


$$K_P = 10^{\frac{22}{20}} = 12.5$$

Normal regulator design (P)

$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

$$G_d(s) = \frac{1.01s + 40.5}{s^2 + 41.25s + 306}$$



$$G_å = \frac{12.5 \cdot 72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

$$G_{cl} = \frac{G_å}{1 + G_å}$$

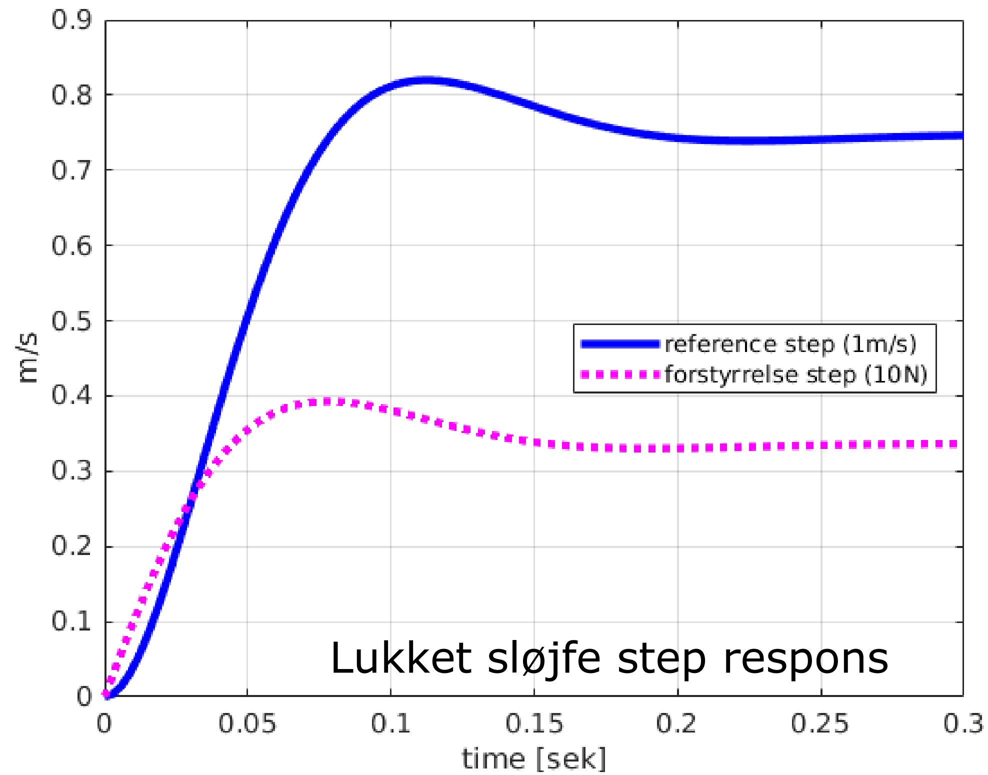
Enhedsstep stationær fejl:

$$e_{r,ss} = \lim_{s \to 0} s \frac{1}{s} \frac{1}{1 + G_å}$$

$$e_{r,ss} = \frac{1}{1 + K_0}$$

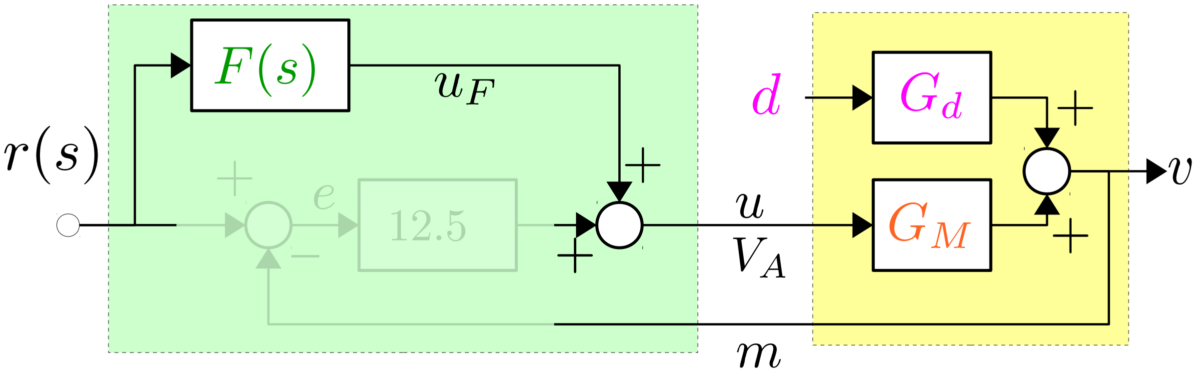
Loop gain ved DC $K_0 = \lim_{s \to 0} G_å$

$$e_{r,ss} = \frac{1}{1 + 12.5 \frac{72}{306}} = 0.25 \quad (25\%)$$



$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

Fremkobling



Steady state

$$G_{M,ss}(s) = \frac{72}{306}$$

$$V_A = 10\text{V} \Rightarrow$$

$$v = 10\frac{72}{306} = 2.35 \text{ m/s}$$

$$e = r\frac{1 - F(s)G_M(s)}{1 + C(s)G_M(s)}$$

Optimal fremkobling (uden regulator)

$$F(s) = \frac{1}{G_M(s)}$$

$$F(s) = \frac{u_F(s)}{r(s)} = \frac{s^2 + 41.25s + 306}{72}$$

$F(s)$ i tidsdomænet

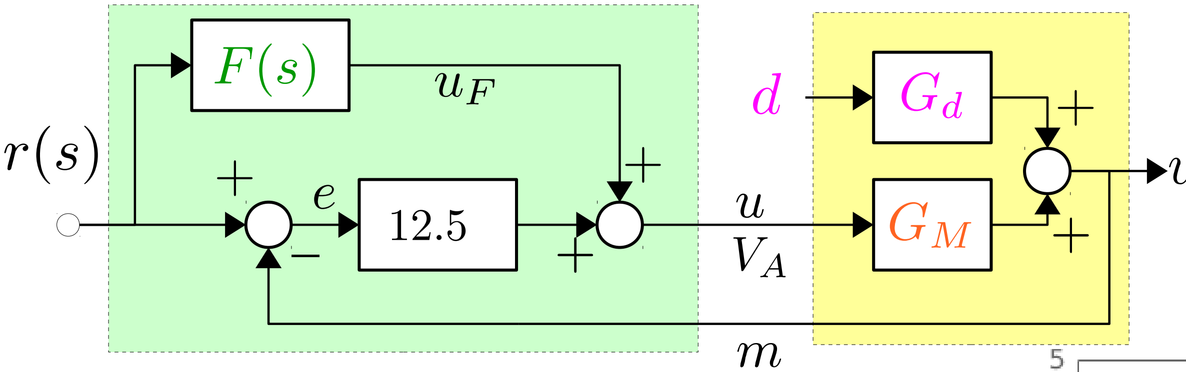
$$u_F(t) = \ddot{r}(t)\frac{1}{72} + \dot{r}(t)\frac{41.25}{72} + r(t)\frac{306}{72}$$

Måske er steady state del nok

$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

$$F_0(s) = \frac{306}{72} = 4.25$$

Fremkobling



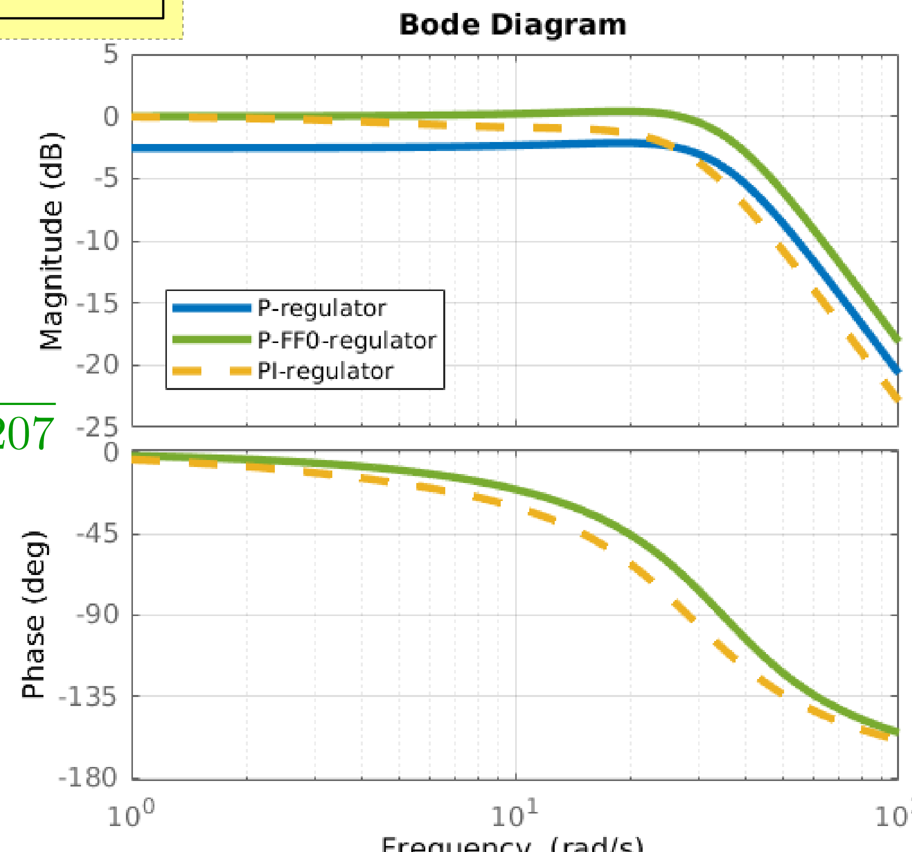
Ny lukket sløjfe

$$G_{cl} = \frac{G_å}{1 + G_å} + \frac{F_0 G_M}{1 + G_å}$$

$$G_{cl} = \frac{901}{s^2 + 41.25s + 1207} + \frac{306}{s^2 + 41.25s + 1207}$$

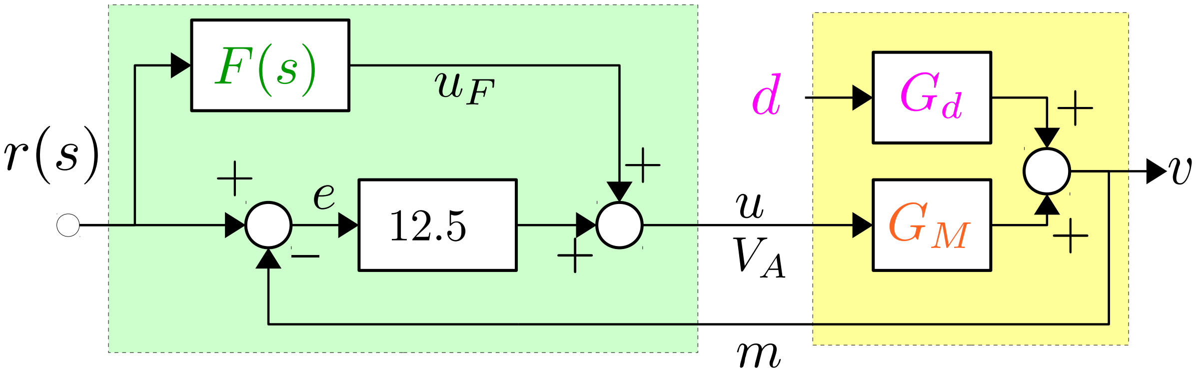
$$G_{cl} = \frac{1207}{s^2 + 41.25s + 1207}$$

Steady state gain nu 1



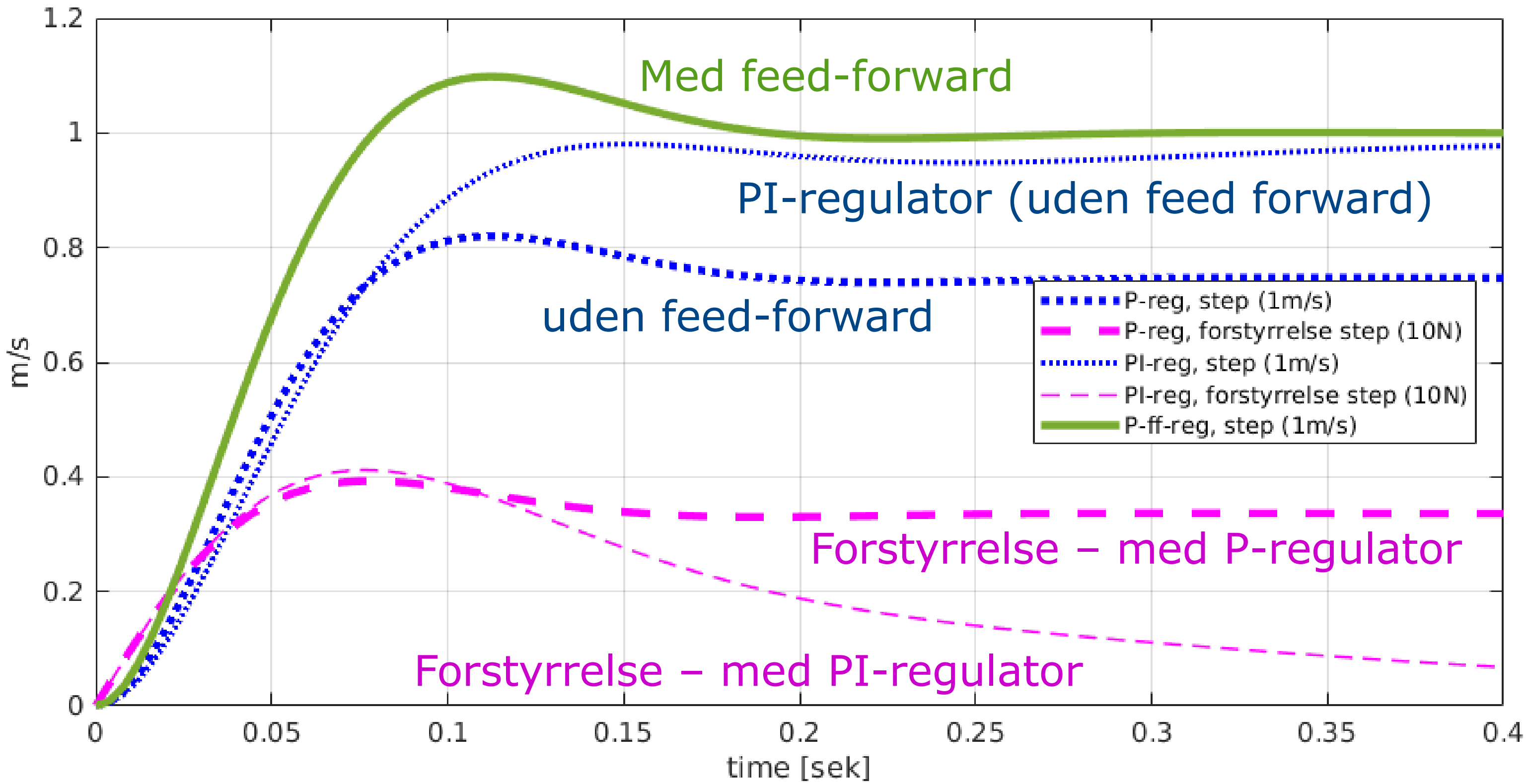
$$G_M(s) = \frac{72}{s^2 + 41.25s + 306}$$

Fremkobling



$$G_{cl,p} = \frac{901}{s^2 + 41.25s + 1207}$$

$$G_{cl,ff} = \frac{1207}{s^2 + 41.25s + 1207}$$



Kontrolspørgsmål
Fremkobling (feed forward)

1) Giver feed forward stabilitetsproblemer?

2) Giver feed forward problemer med forstærkning af målestøj?

3) Giver feed forward problemer med integrator wind-up?

4) Hjælper feed forward med undertrykkelse af forstyrrelser?

5) Hvis systemet der skal reguleres indeholder en integrator,
Vil det så stadig være en fordel med denne type feed forward?

Kontrolspørgsmål
Fremkobling (feed forward)

1) Giver feed forward stabilitetsproblemer?
   Nej, feed forward påvirker ikke polplacering
   (indgår ikke i reguleringssløjfen)

2) Giver feed forward problemer med forstærkning af målestøj?
   Nej

3) Giver feed forward problemer med integrator wind-up?
   Feed forward kan fjerne statisk fejl uden at give wind-up problemer.

4) Hjælper feed forward med undertrykkelse af forstyrrelser?
   Nej, desværre ikke.

5) Hvis systemet der skal reguleres indeholder en integrator,
   Vil det så stadig være en fordel med denne type feed forward?

   Nej, feed forward bruger kun steady state led af $G_M(s)$

$$G_M(s) = \frac{b}{a_2 s^2 + a_1 s + 0} \Rightarrow \lim_{s \to 0} \frac{1}{G_M} = 0$$

Feed forward af forstyrrelse

Reguleringsteknik 1

J. Christian Andersen

Kursusuge 12

Plan

- Feed forward af input
- Feed forward af forstyrrelser
- Systemer med tidsforsinkelse

Gruppereregning

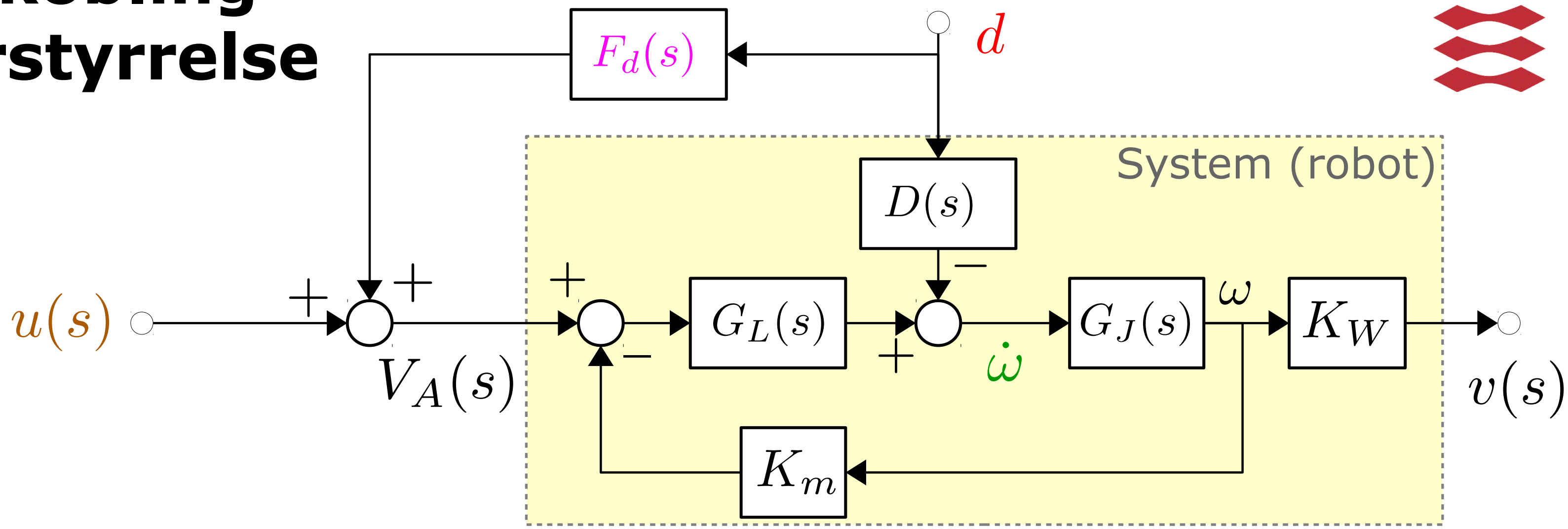
- Feed forward og delay design

Øvelse 10+11+12

- REGBOT balance øvelse

DTU Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Fremkobling af forstyrrelse



$$\dot\omega = -dD - \dot\omega G_J K_m G_L + dF_d G_L + uG_L$$

$$v(s) = \dot\omega(s) G_J(s) K_W$$

$$\dot\omega(1 + G_J K_m G_L) = d(F_d G_L - D)$$

$$\dot\omega = d\frac{F_d G_L - D}{1 + G_J K_m G_L}$$

$$v = d\frac{F_d G_L - D}{1 + G_J K_m G_L} G_j K_W$$

$$F_d = \frac{D}{G_L} \quad \Rightarrow \quad \frac{v(s)}{d(s)} = 0$$

Eksempel

$$D(s) = 0.02 \qquad G_L(s) = \frac{0.016}{0.05s + 2}$$

0. orden fremkobling

$$F_{d1}(s) = 0.02\frac{2}{0.016} = 2.5$$

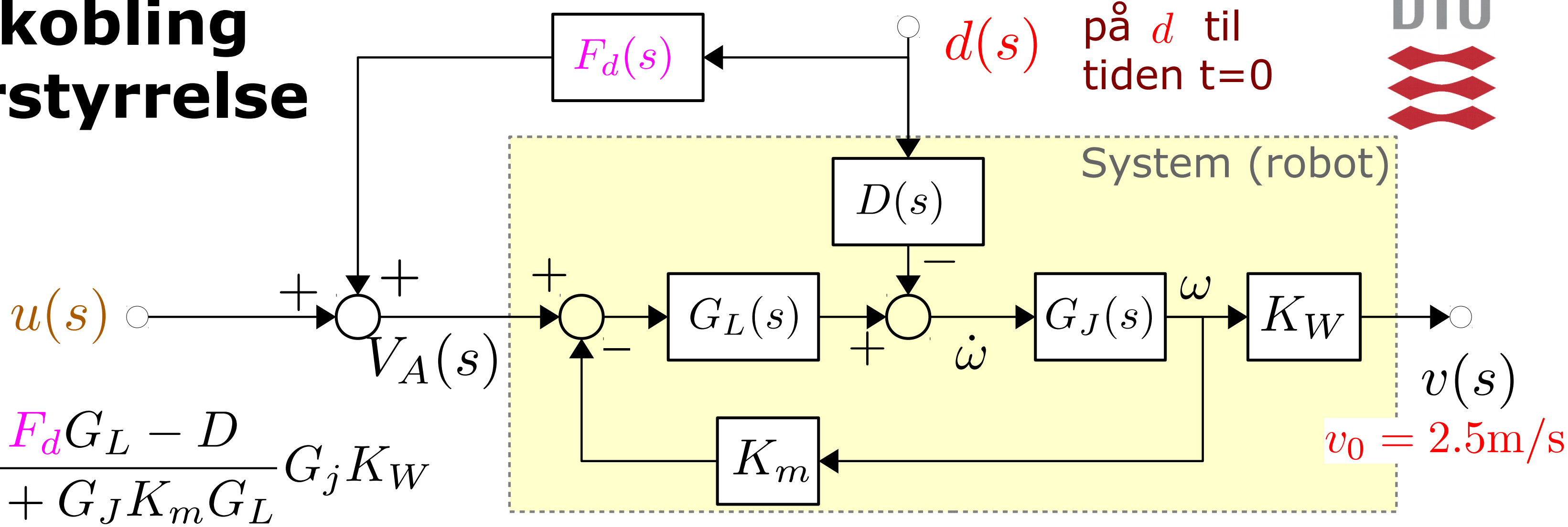
1. orden (praktisk) fremkobling

$$F_{d2}(s) = \frac{0.02\ (0.05s + 2)}{0.016(0.00025s + 1)}$$

Ekstra pol

Fremkobling af forstyrrelse

Enhedsstep på d til tiden t=0



$$v = d\frac{F_d G_L - D}{1 + G_J K_m G_L} G_j K_W$$

$$F_d = \frac{D}{G_L} \Rightarrow \frac{v(s)}{d(s)} = 0$$

Optimal fremkobling

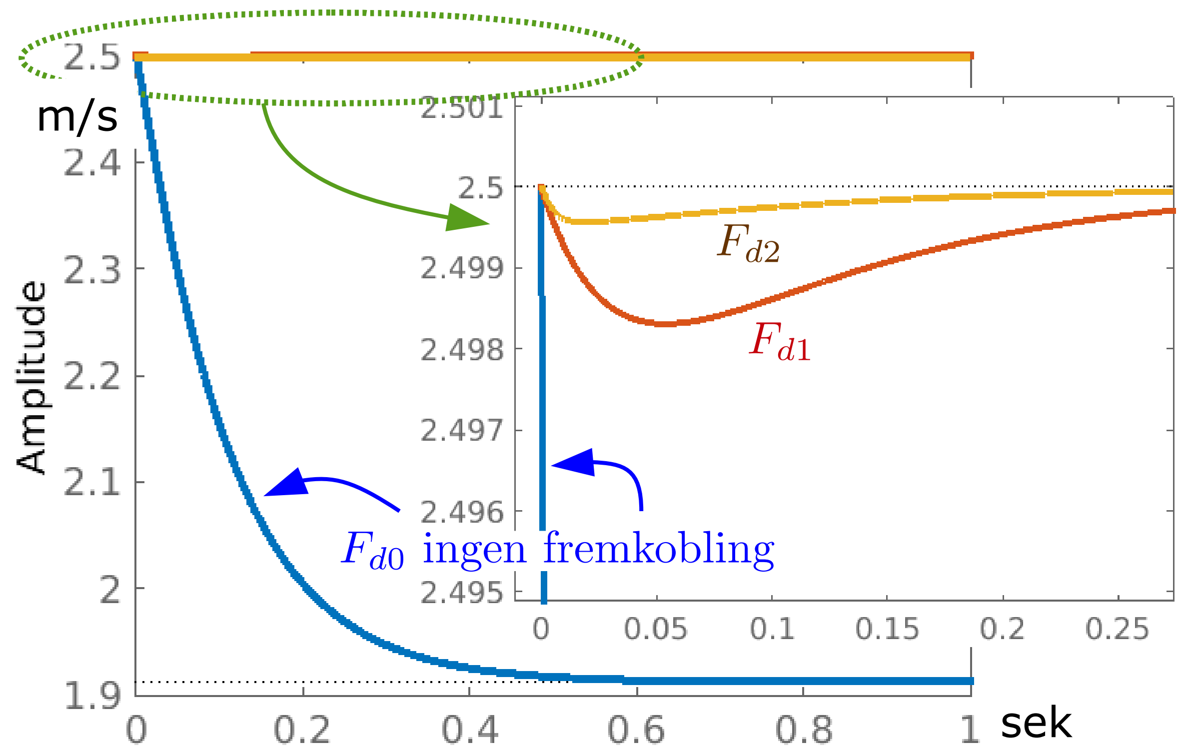
$$\frac{D}{G_L} = 0.02\frac{0.05s + 2}{0.016}$$

0. orden fremkobling

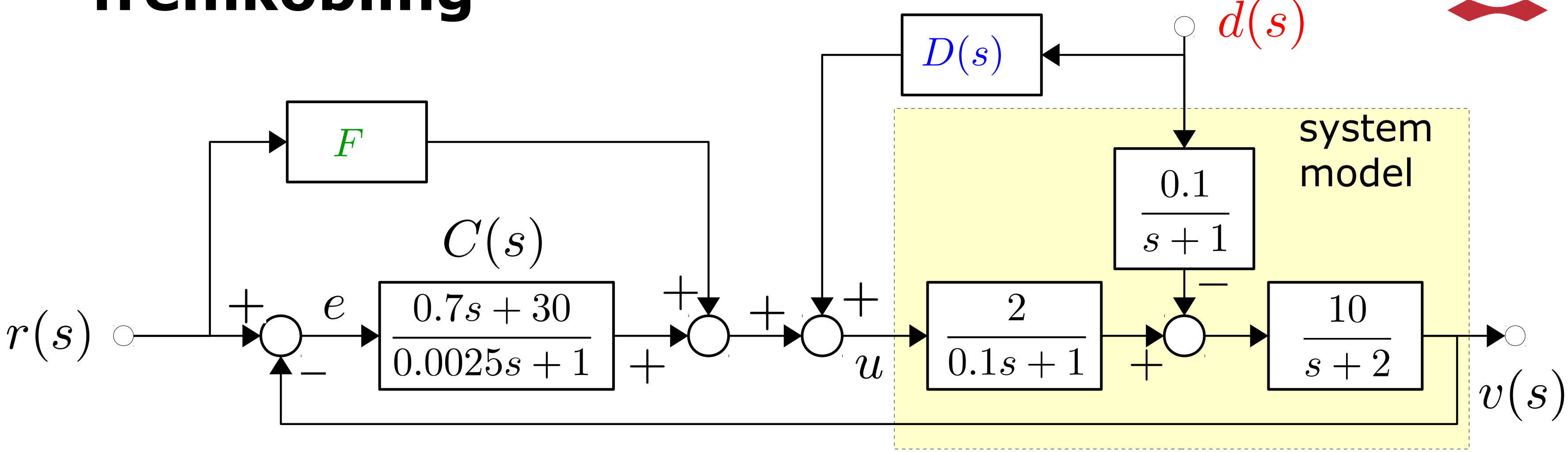
$$F_{d1}(s) = 0.02\frac{2}{0.016} = 2.5$$

1. orden fremkobling

$$F_{d2}(s) = \frac{0.02\,(0.05s + 2)}{0.016(0.005s + 1)}$$



Kontrolspørgsmål 2 - fremkobling



Opgaver

a) Hvilken gain *F* fjerner statis fejl for step på r(s) ?

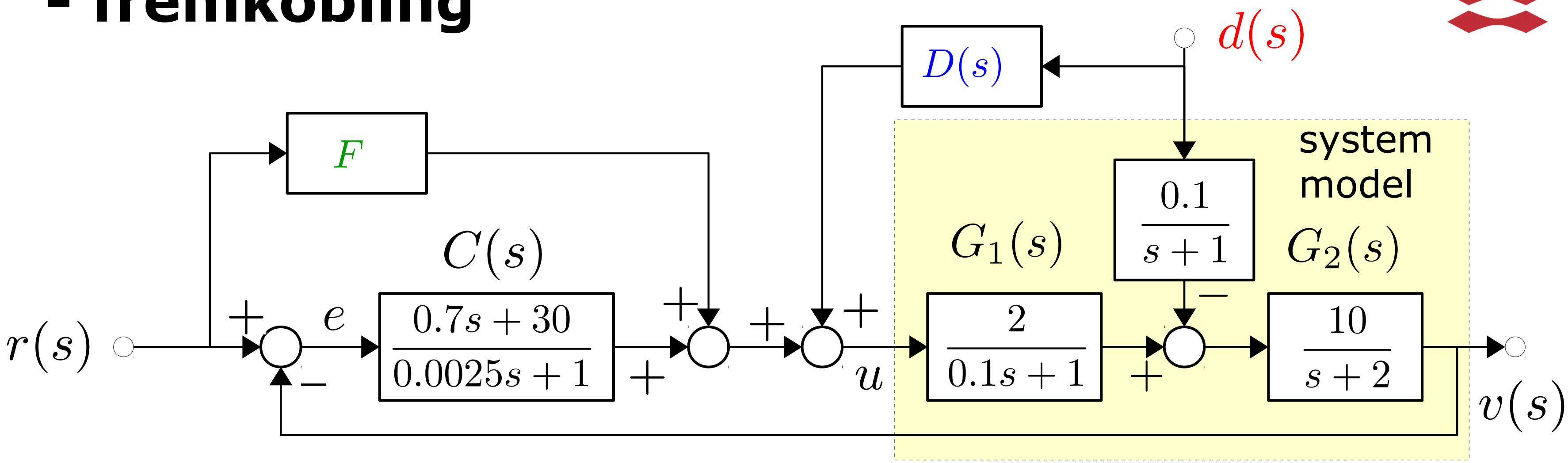
b) Hvad bliver overføringsfunktionen fra *r(s)* til *v(s)*?

c) Hvis D(s) kun er en gain, hvilken værdi skal D så have?

d) Hvad er optimal fremkobling $D(s)$?

e) Hvis der ikke er modelfejl, vil optimal $D(s)$ så fjerne effekt af $d(s)$?

Kontrolspørgsmål 2 - fremkobling



$$G_{cl} = \frac{v(s)}{r(s)}$$

$$G_{cl} = F\frac{G_1G_2}{1+Gå} + \frac{Gå}{1+Gå}$$

$$G_{cl} = \frac{FG_1G_2 + Gå}{1+Gå}$$

$$G_{cl} = \frac{56020s + 2408000}{s^3 + 412s^2 + 60820s + 2408000}$$

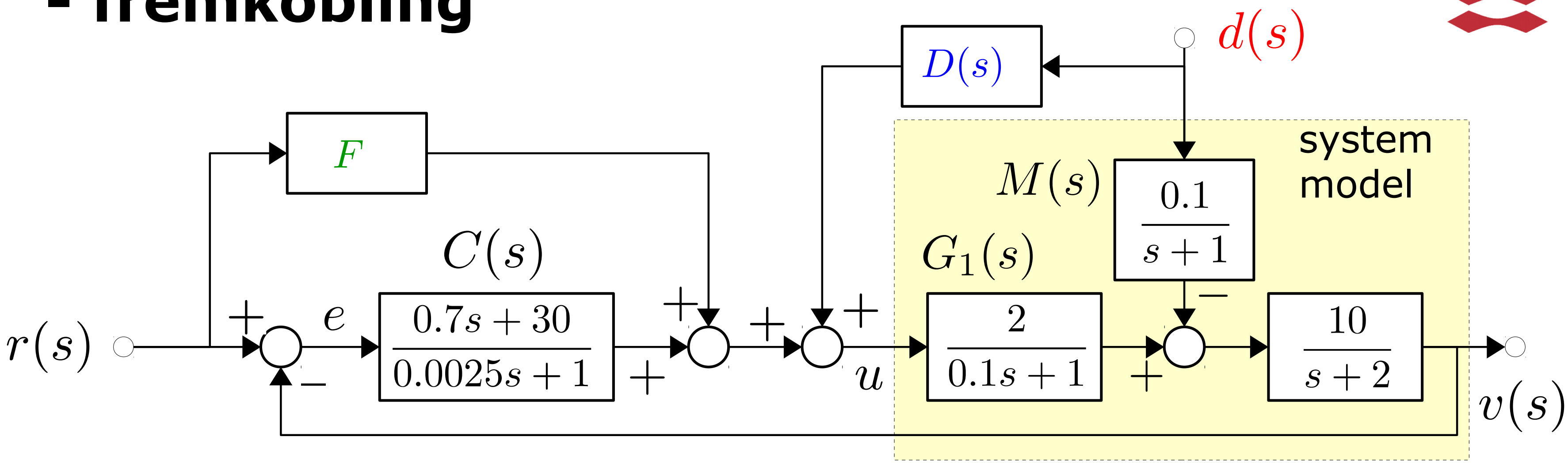
Opgaver

a) Hvilken gain *F* fjerner statis fejl for step på r(s) ?

Fra *u* til v er statisk gain 10, derfor derfor må statis gain F=0.1

b) Hvad bliver overføringsfunktionen fra *r(s)* til *v(s)*?

Kontrolspørgsmål 2 - fremkobling



c) Hvis D(s) kun er en gain, hvilken værdi skal D så have?

$$D(s) = \frac{M}{G_1} = \frac{0.1(0.1s+1)}{(s+1)2}$$

$$D = \lim_{s\to 0} = \frac{0.1(0.1s+1)}{(s+1)2} = 0.05$$

d) Hvad er optimal fremkobling $D(s)$?

$$D(s) = \frac{M}{G_1} = \frac{0.1(0.1s+1)}{(s+1)2}$$

e) Hvis der ikke er modelfejl, vil optimal $D(s)$ så fjerne effekt af $d(s)$?

Ja

Systemer med tidsforsinkelse

Reguleringsteknik 1

J. Christian Andersen

Kursusuge 12

Plan

- Feed forward af input
- Feed forward af forstyrrelser
- Systemer med tidsforsinkelse

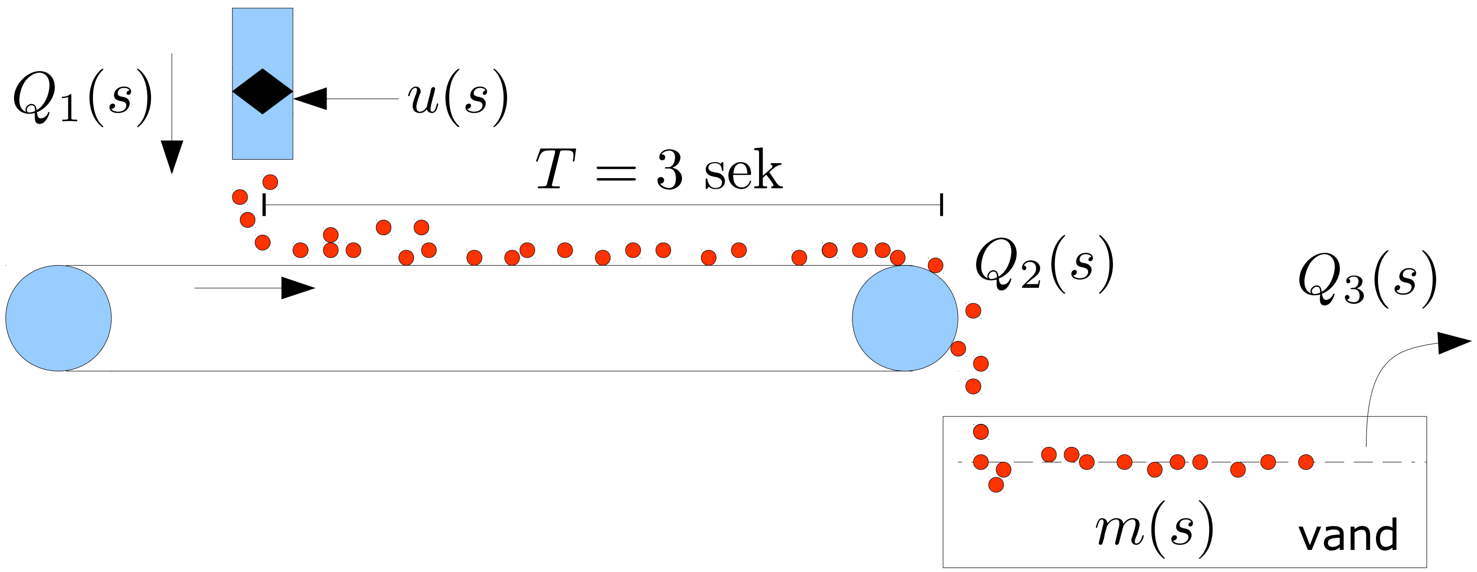
Grupperegning

- Feed forward og delay design

Øvelse 10+11+12

- REGBOT balance øvelse

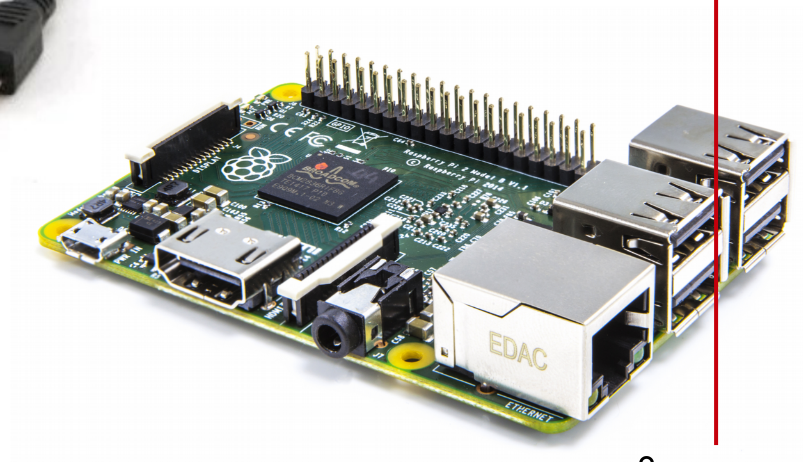
Forsinkelse i overføringsfunktioner eksempel



Forsinkelse på transportbånd
Flow kan styres med u(s) og antal i bassin m(s) måles

Forsinkelse Eksempel

Gør lysere



Måling:
- for mørkt
(stadig)

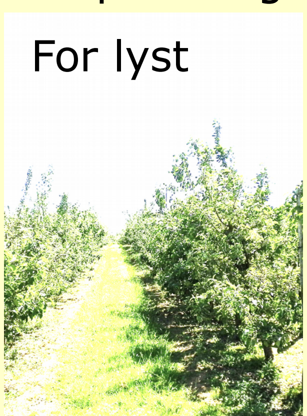
Under eksponering

kamera buffer

På vej

Driver Buffer (xN)

For lyst

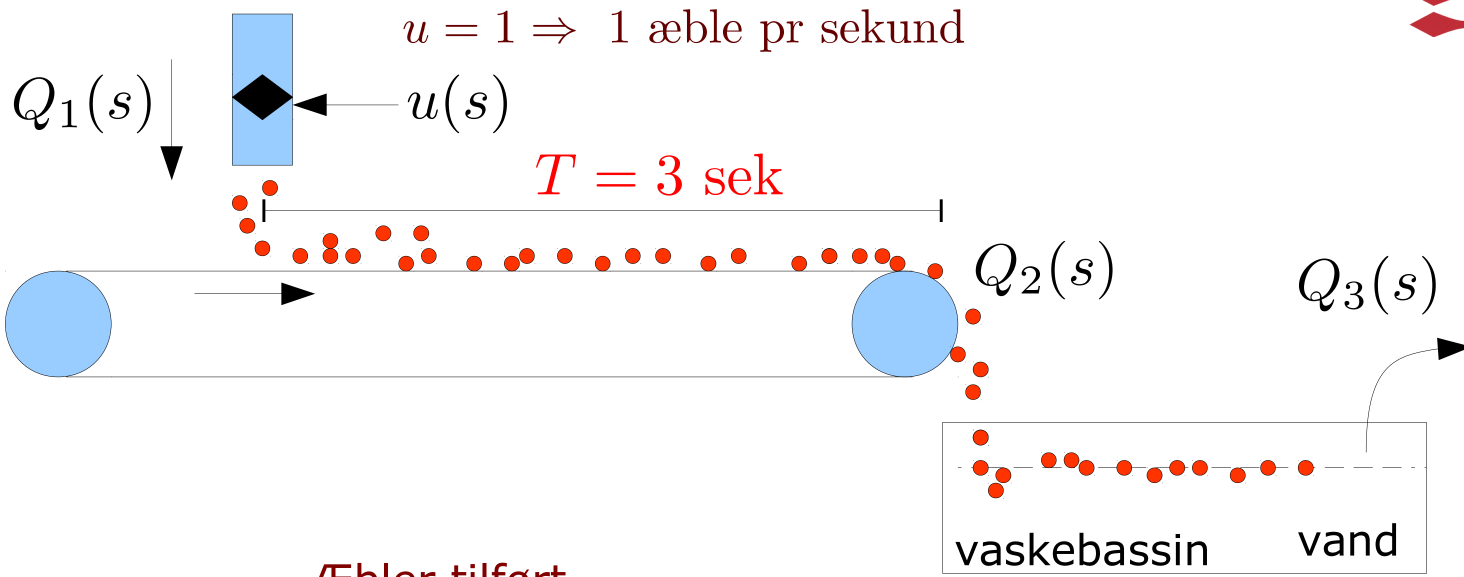


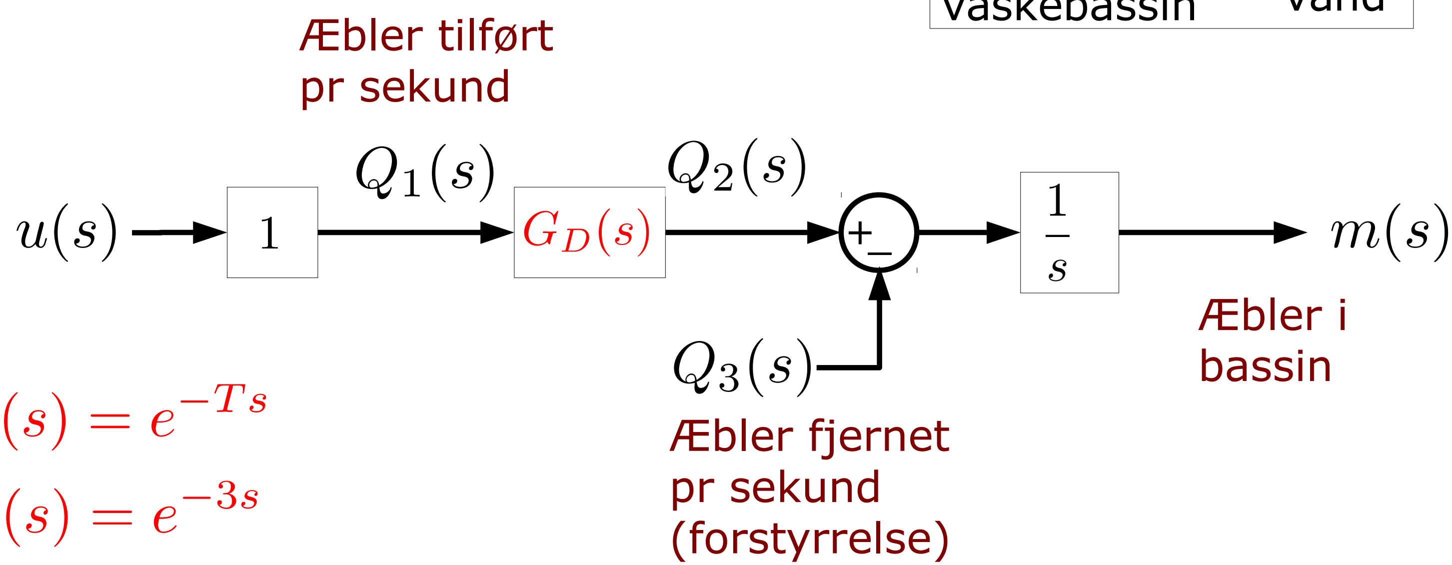
OK

OK
(lidt mørkt)

Billeder der endnu ikke er modtaget i software

Transportbånd eksempel (æblekagefabrik)





$$G_D(s) = e^{-Ts}$$

$$G_D(s) = e^{-3s}$$

Forsinkelse
Padé tilnærmelse

$$G(s) = e^{-Ts}$$

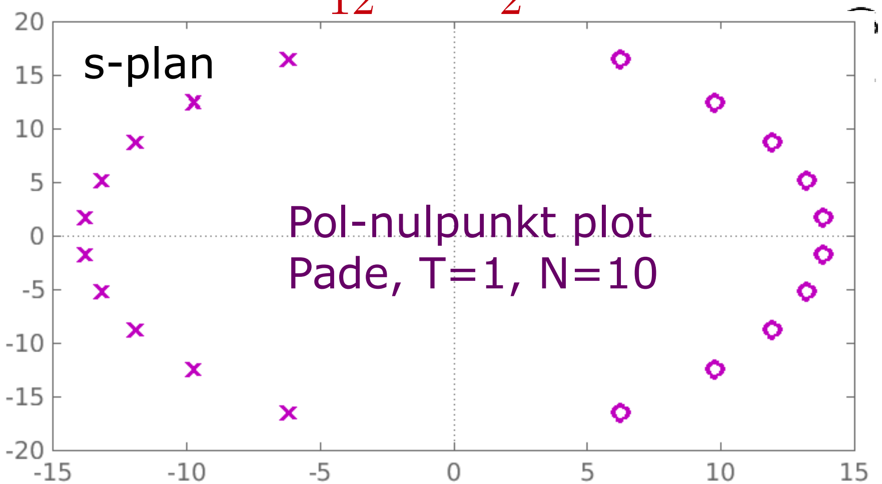
[num,den] = pade(T,N)

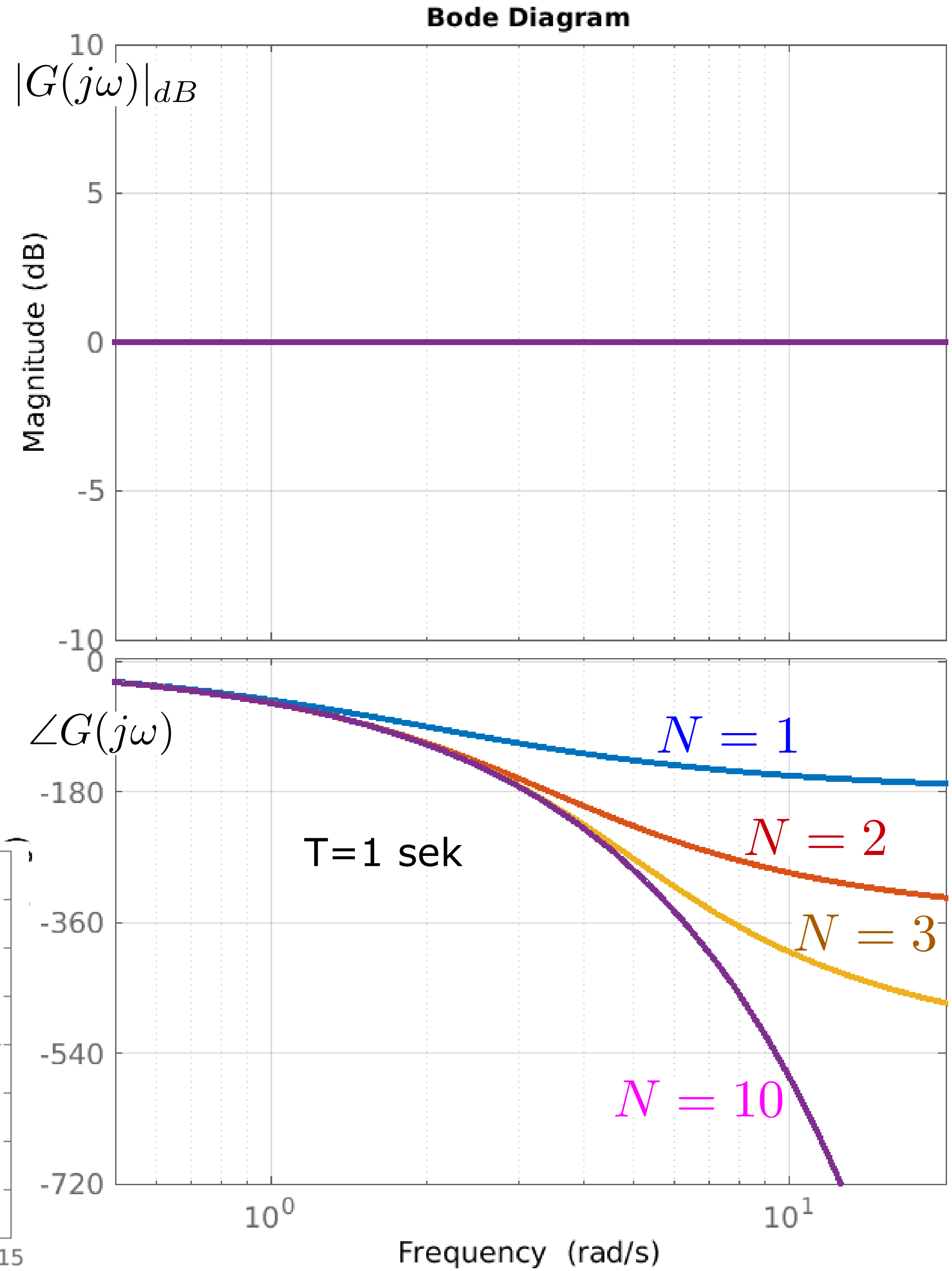
$N = 1$

$$G_{p1}(s) = \frac{-\frac{T}{2}s + 1}{\frac{T}{2}s + 1}$$

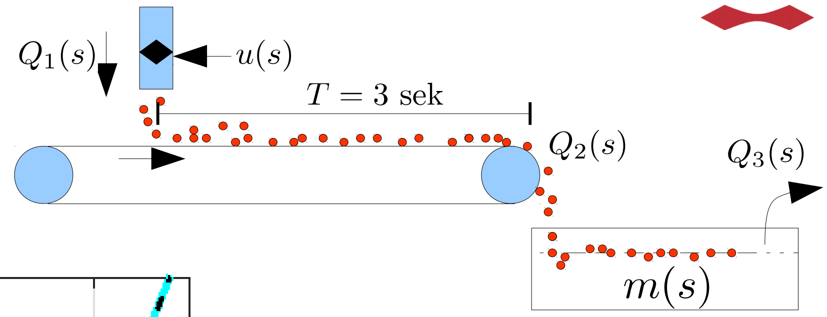
$N = 2$

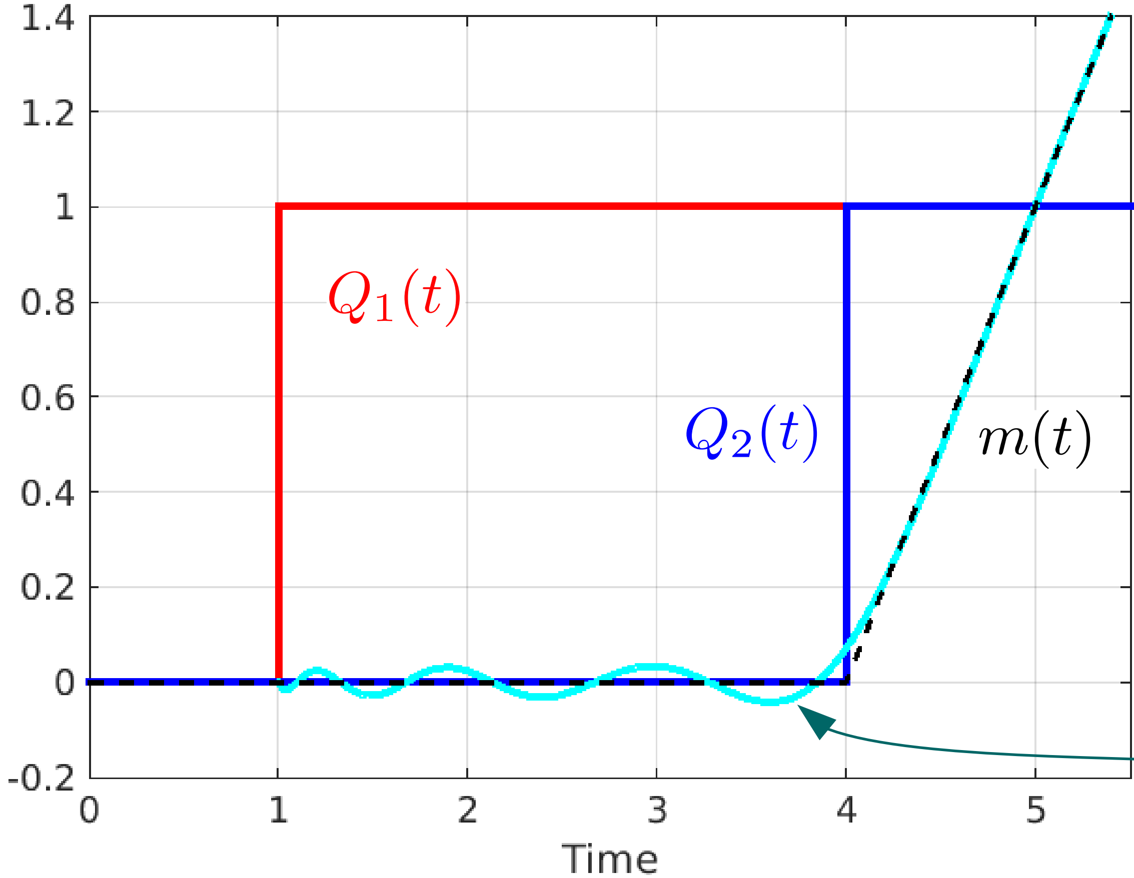
$$G_{p2}(s) = \frac{\frac{T^2}{12}s^2 - \frac{T}{2}s + 1}{\frac{T^2}{12}s^2 + \frac{T}{2}s + 1}$$





Forsinkelse i overføringsfunktioner





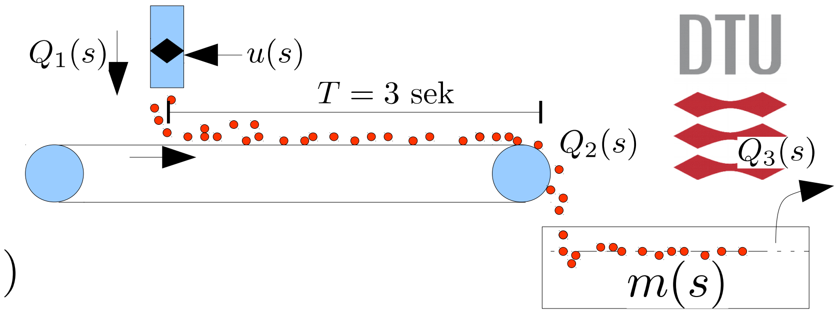
$$m(s) = u(s)\frac{e^{-3s}}{s} - Q_3(s)\frac{1}{s}$$

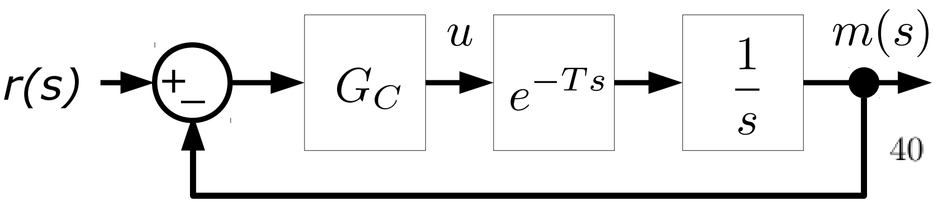
$$Q_3(t) = 0$$

$pade(T, N)$

$N = 7$ tilnærmelse

Regulering af æblevask





$$G = \frac{m(s)}{u(s)} = \frac{e^{-3s}}{s}$$

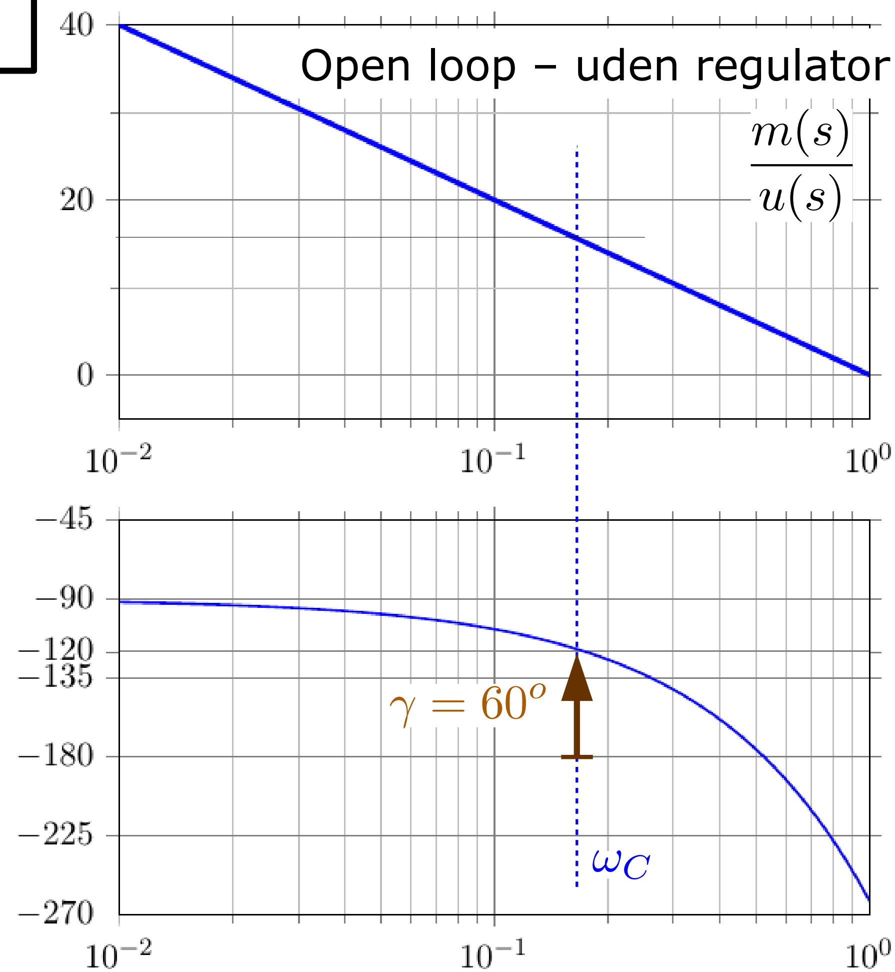
$$\gamma_M = 60^o$$

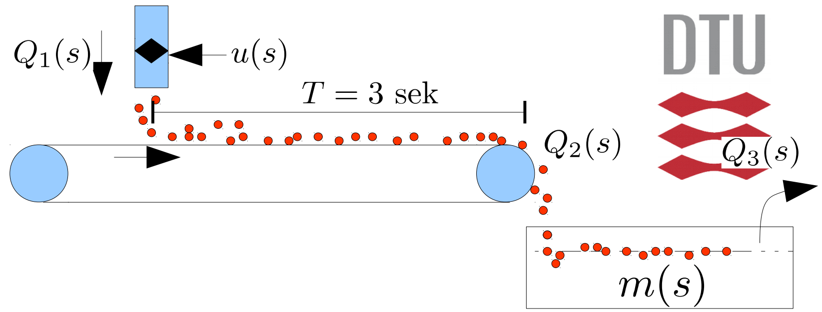
P-regulator

$$\omega_C = 0.17 \text{ rad/s}$$

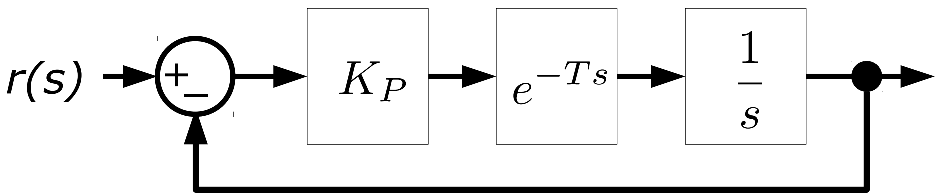
$$|G(j\omega_C)|_{dB} = 15 \text{ dB}$$

$$K_P = \frac{1}{5.7} = 0.175$$



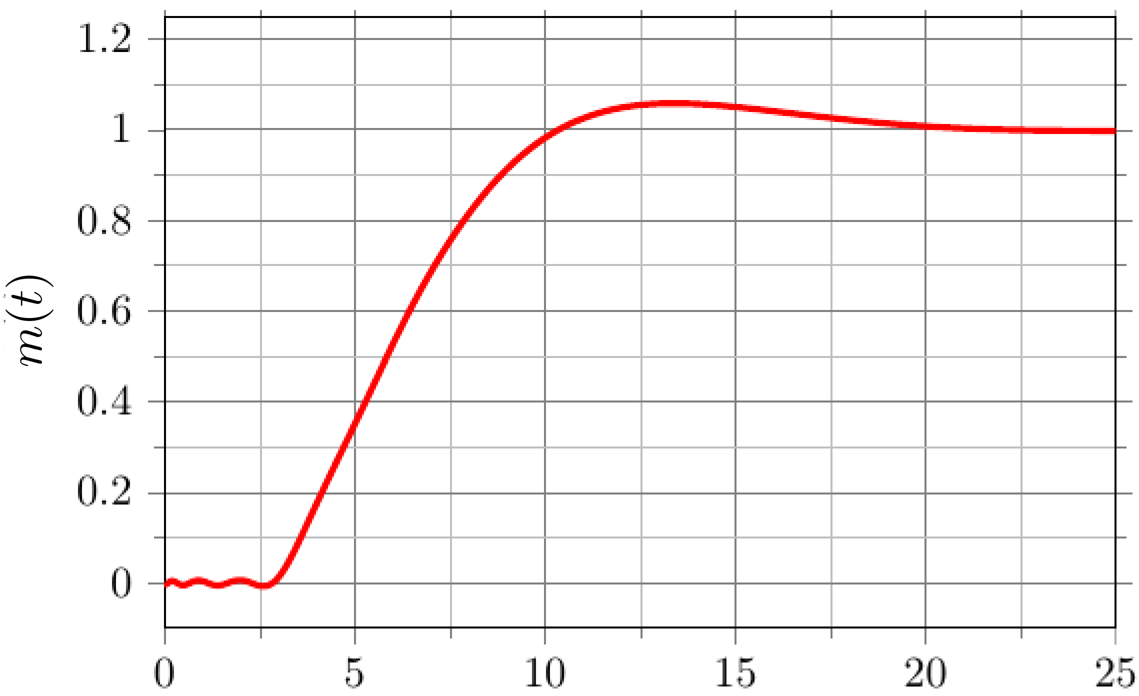


Æblevask eksempel

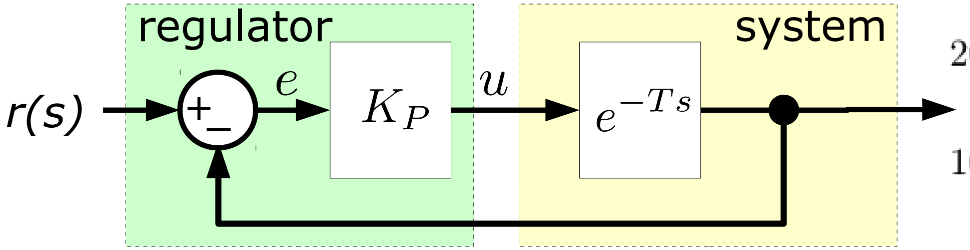


$T = 3$

$K_P = 0.175$



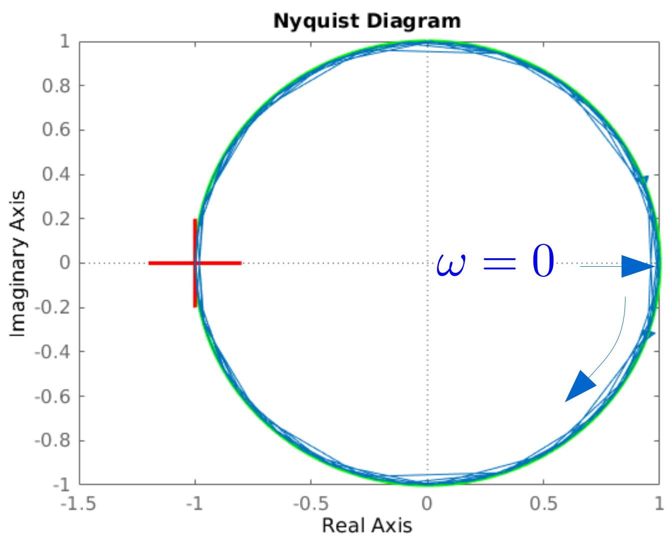
Regulering af **kun delay**



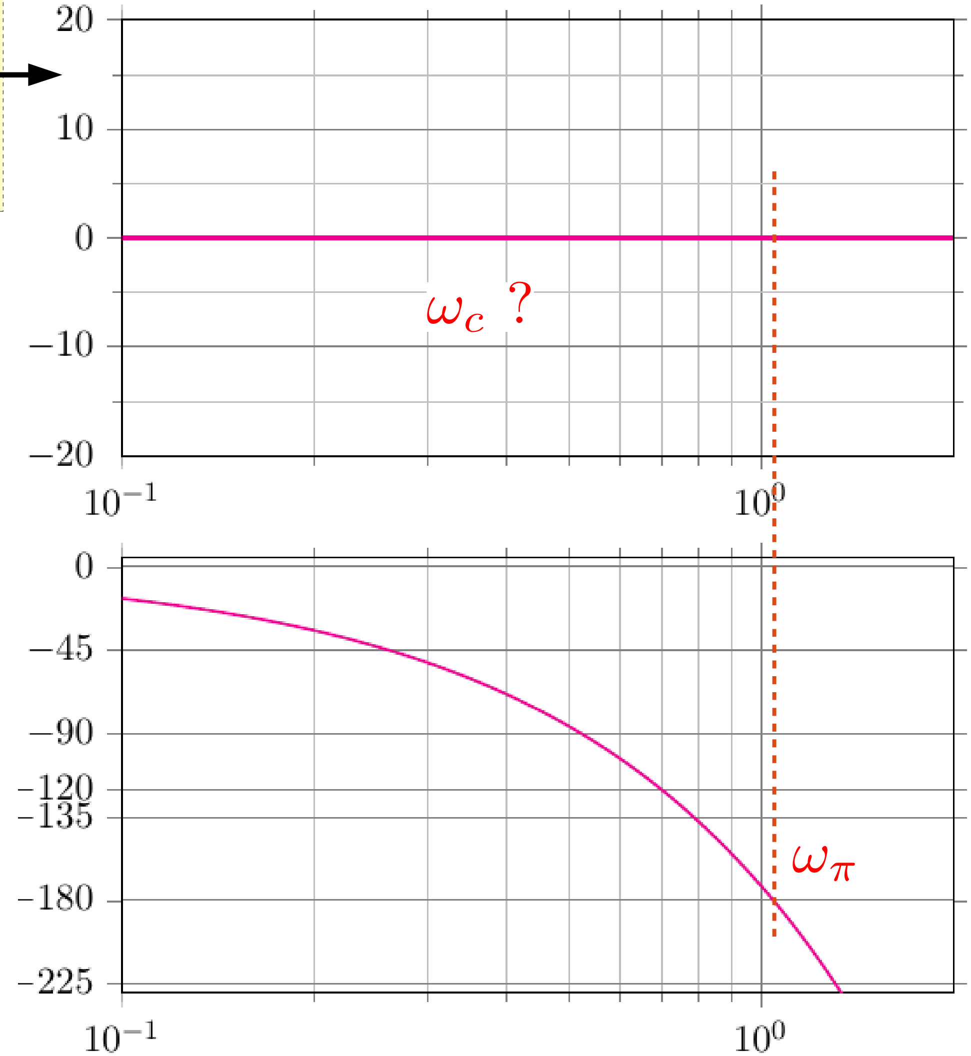
Hvilken K_P gør lukket sløjfe stabil?

$$K_P = ?$$

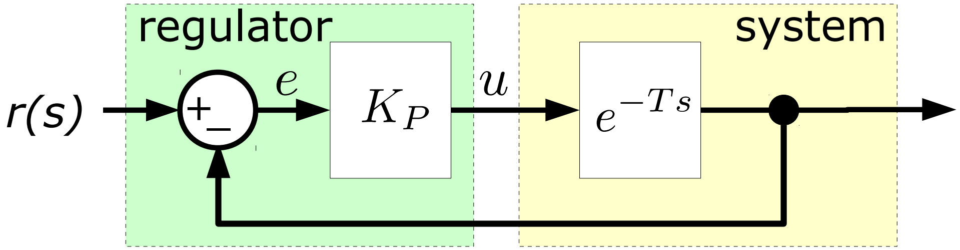
Fasemargin, gainmargin?



Bodeplot af system uden regulator (T=1)



Regulering af kun delay



Hvilken K_P gør lukket sløjfe stabil?

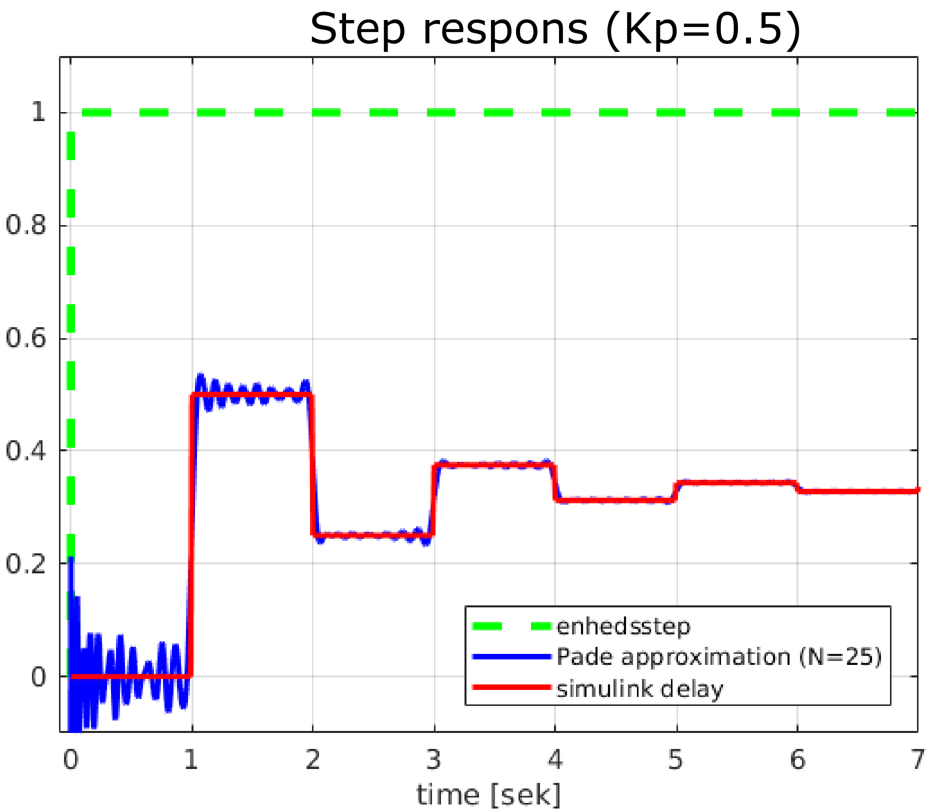
$$K_P = 0.5$$

Stationær fejl (enhedsstep på *r(s)*)

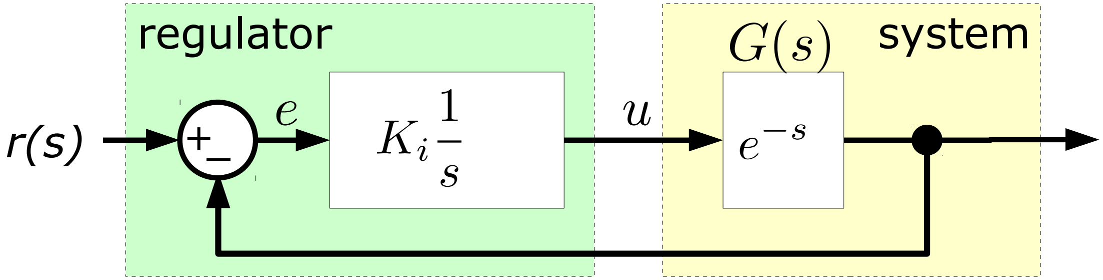
$$e_{r,ss} = \lim_{s\to 0} s \, \frac{1}{s} \, \frac{1}{1 + K_P \, e^{-Ts}}$$

$$e_{r,ss} = \frac{1}{1 + K_P}$$

$$e_{r,ss} = 0.67 \; (67\%)$$



Regulering af kun delay – I-regulator



I-regulator – PI kan bruges
- system med I-led:

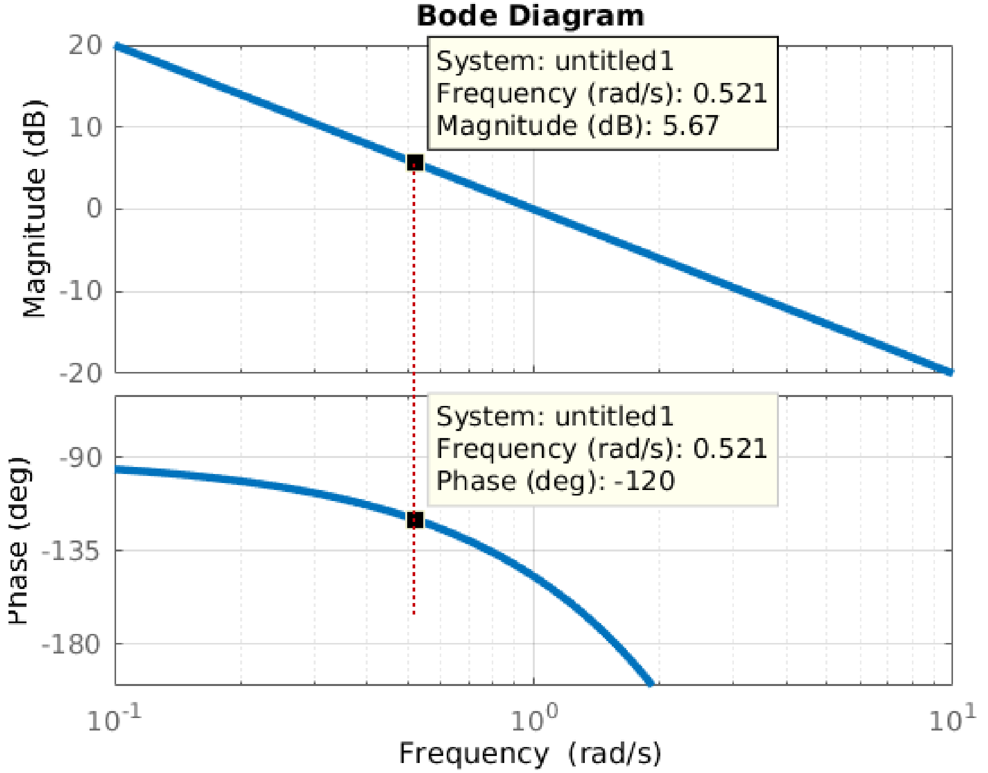
$$G_i = \frac{e^{-s}}{s}$$

$$\gamma_M = 60^o$$

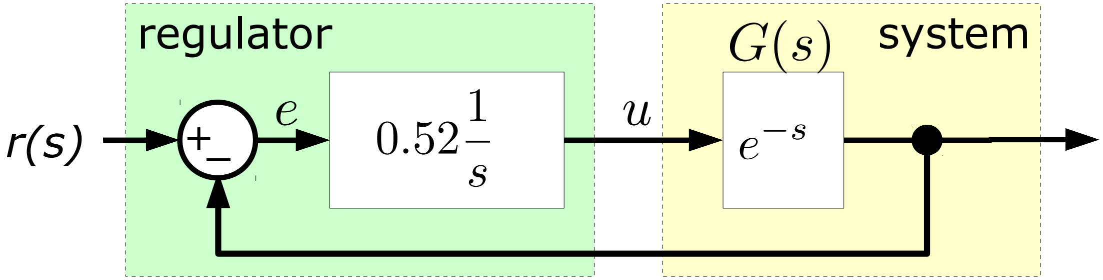
$$\angle G_i(\omega_c) = -180 + \gamma_M = -120^o$$

$$\omega_c = 0.521 \text{ rad/sek}$$

$$K_i = 10^{\frac{-5.67}{20}} = 0.52$$

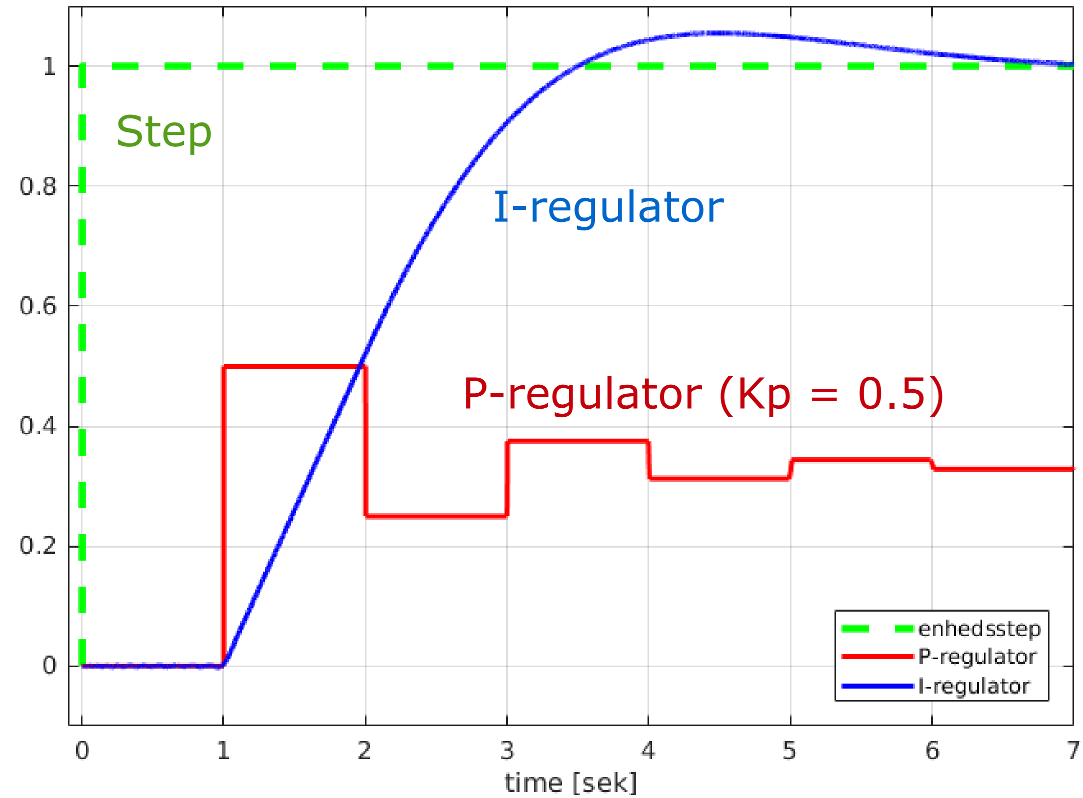


Regulering af kun delay – I-regulator

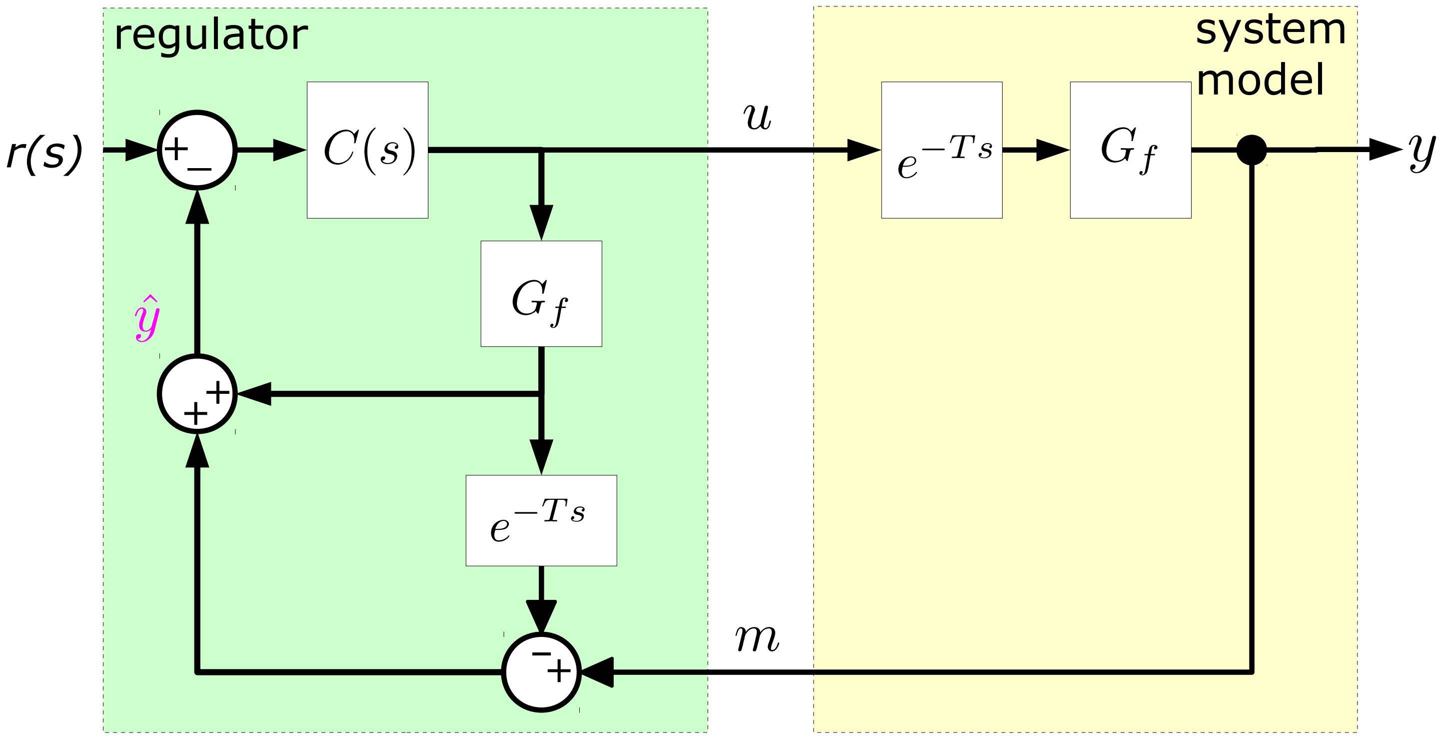


Delay: 1 sekund

Indsvingningstid
ca. 6 sekunder



Schmidt predictor - bedre metode



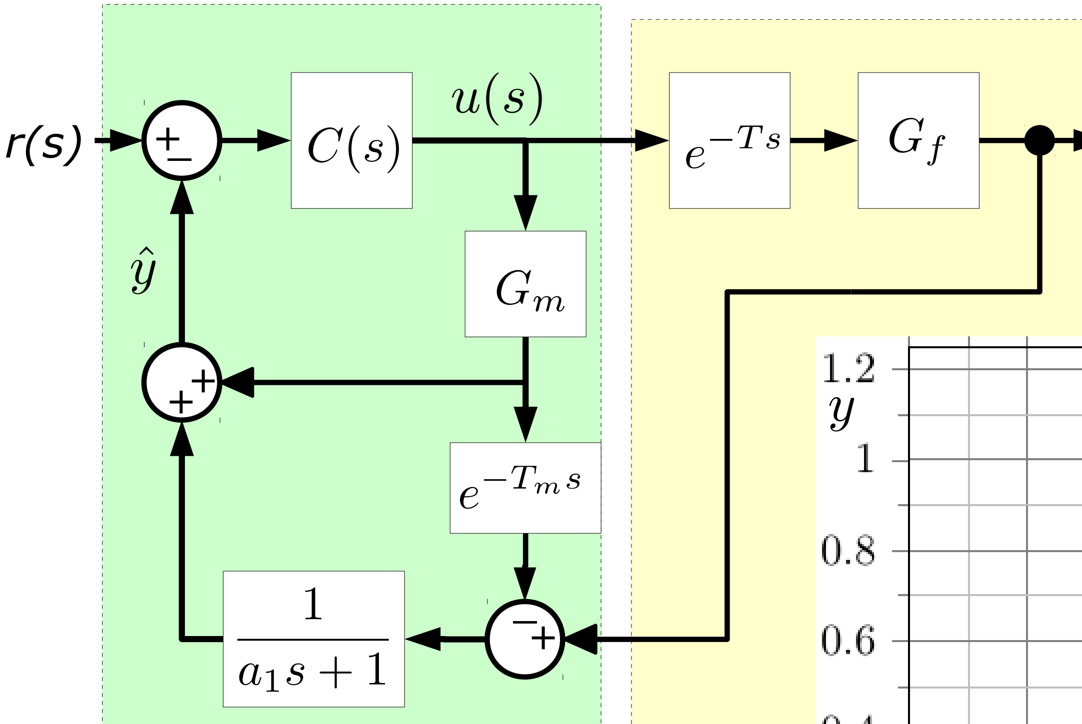
$$\hat{y} = u(e^{-Ts}G_f + G_f - G_f e^{-Ts})$$

$$\hat{y} = uG_f$$

G_C kan nu designes uden hensyn til forsinkelse!

Hvad hvis model er usikker?

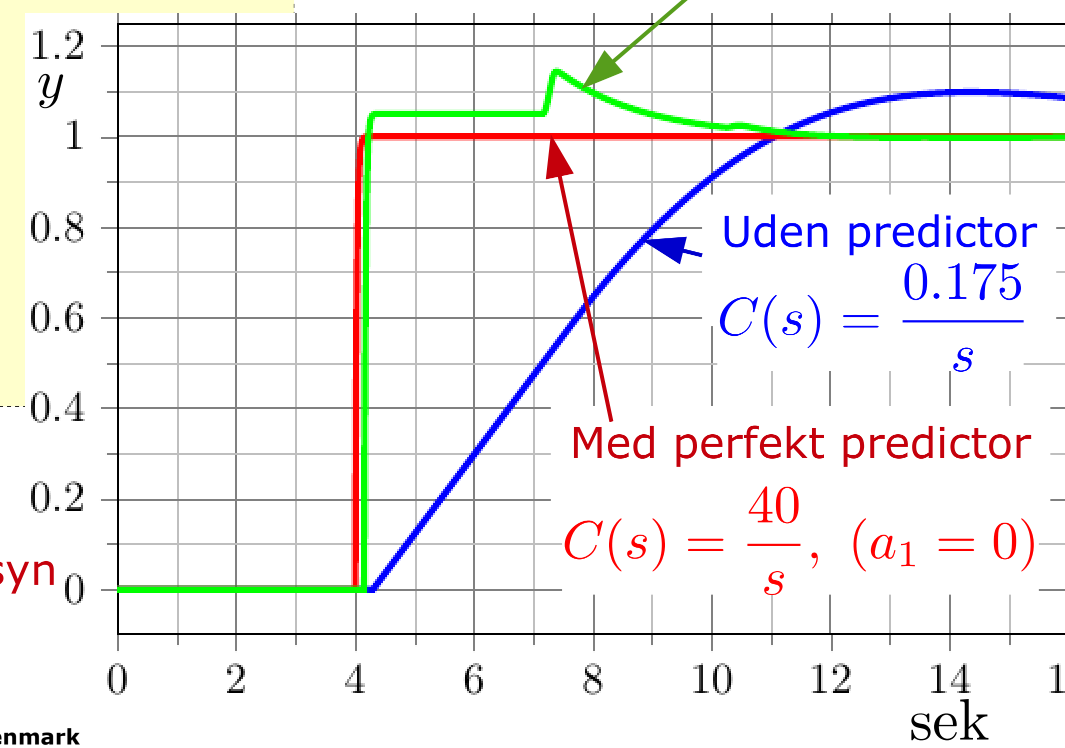
Schmidt predictor (stadig I-regulator) - hvis usikkerhed i *T* eller *Gf(s)*



Med predictor og 5% modelfejl

$T = 3.15, \; G = 1.05$

$C(s) = \frac{40}{s}, \; a_1 = 1.5$



$G_m = G_f = 1$

$T_m = T = 3$ sek

$a_1 \approx |\underbrace{T - T_m}_{\text{usikkerhed}}|10$

G_C kan designes *næsten* uden hensyn til forsinkelse

Kontrolspørgsmål
Systemer med forsinkelse

Spørgsmål

a) En forsinkelse i Laplace e^{-Ts}
Hvordan skrives det i polynomium-form?

b) Et system med kun forsinkelse,
Hvad er ulempen ved en P-regulator?

c) Et system med kun forsinkelse,
Hvad er ulempen ved en I-regulator?

Kontrolspørgsmål
Systemer med forsinkelse

Spørgsmål

a) En forsinkelse i Laplace e^{-Ts}
Hvordan skrives det i polynomium-form?

Forsinkelsen omformuleres med Padé approksimation, der består af en serie poler og nulpunkter, og hvor nulpunkter har samme værdi som poler, men i højre halvplan

b) Et system med kun forsinkelse,
Hvad er ulempen ved en P-regulator?

Stor stationær fejl og lang indsvingningstid

c) Et system med kun forsinkelse,
Hvad er ulempen ved en I-regulator?

Lang indsvingningstid

Nu og fremover

- Grupperegning – feed forward og delay
- Dagens øvelse: REGBOT Balance fortsat

- Husk kursusevaluering
  (bruges af underviser, studienævn, nye studerende, DTU, ministerium)

- Plan for resten af kurset (lektion og øvelse)
  - Kursusuge 13: Prøveeksamen, kursusevaluering
    (*REGBOT rapport*)
  - Skriftlig eksamen – 4 timer ca. 20 spørgsmål