EL1000/1120/1110 Reglerteknik AK

Föreläsning 12:
Sammanfattning

Dagens program

- Kursinfo om lab 3 och tentan
- Kort sammanfattning av kursen
- Andra reglerteknikkurser
- Tips och extra repetition av kompensering
- Andra frågor
- Ev. några tentatal

Kursinformation

- Frågestunder inför tentan:
  - Måndag 10 dec kl. 17-18 i sal V01 (José)
  - Tisdag 11 dec kl. 17-18 i sal V01 (António)
  - Onsdag 12 dec kl. 16-17 i sal V21 (Olle)
  - Fredag 14 dec kl. 10-11 i sal M24 (Patricio)

Lab 3

- Redovisas på 15 min (inom bokat pass på 60 minuter)
- Var väl förberedd, testa alla program på XQ-dator innan redovisning
- Om du har problem med *lab3robot,* så kom ändå till redovisningen

Tenta

- Måndag 17/12, kl. 9-14
- Kursbok och räknetabeller OK, men **ej** övningar och extentor etc.
- 5 uppgifter, 10 poäng per uppgift
- Läs igenom samtliga uppgifter innan du börjar räkna!
- **Motivera** varje steg i lösningen!
- Resultat rapporteras genom ”Mina sidor”

Kursutvärdering

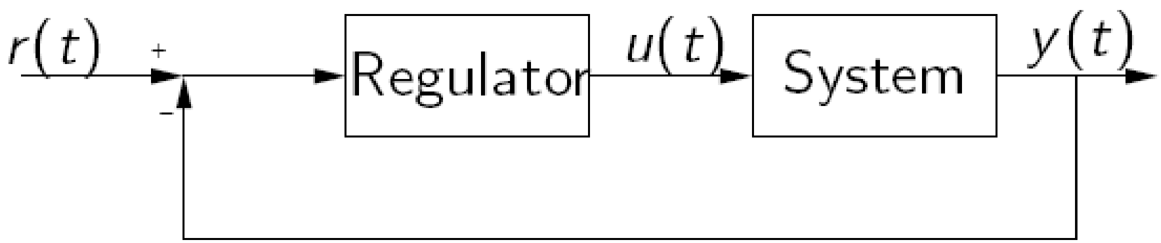
- Var snäll och fyll i **kursenkät efter tentamen.** Skickas ut via epost.

Reglerteknik

Reglerteknik → ändra systemegenskaper genom återkopping

Typiskt reglerteknikprojekt

1. **Problem.** Förbättra systemegenskaper genom aktiv styrning, dvs. återkopplad reglering



Syften:

- stabilitet, robusthet
- börvärdesföljning (=referensvärdesföljning)
- reducera störningskänslighet

Val av signaler

2. **Signaler:** vilka variabler skall vi
   - styra $\longrightarrow$ utsignal y
   - styra med $\longrightarrow$ styrsignal u
   - motverka $\longrightarrow$ störningar d
   - mäta $\longrightarrow$ y, z

Modellering

3. **Modellering:** ta fram matematisk beskrivning av systemets dynamiska beteende, dvs. samband styrsignal, störningar och utsignal

   - *fysikaliska samband* t.ex. kraftlagen $m\dot{v} = F - kv$
   - *experiment:* samla in data och anpassa till modell (systemidentifiering)
   - *linjärisering* (Taylorutveckling): ger linjär modell i avvikelsesvariabler

Systembeskrivningar

- Beskrivningar, från linjära diferentialekvationer
  - Laplace, ger **överföringsfunktion** $G(s)$
  - $s = i\omega$ ger **frekvenssvar** $G(i\omega)$
  - skriv som 1:a ordningens differentialekvationer på matrisform, ger **tillståndsform**

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t)$$
$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

$$\dot{x} = Ax+Bu\,;\, y = Cx+Du \;\Leftrightarrow\; G(s) = C(sI-A)^{-1}B+D \;\Leftrightarrow\; G(i\omega)$$

Specifikationer

4. **Specifikationer:** vilken prestanda krävs av slutna systemet?
   - **Stegsvar:** stigtid, översläng, insvängningstid, stationärt fel
   - **Frekvenssvar:** bandbredd, resonanstopp, stationärt fel, robusthet
   - **Tillstånd:** poler, stationärt fel

Design och analys

5. **Regulatordesign:** bestäm $F(s)$ och säkerställ att alla specifikationer är uppfyllda.

- Design:
  - PID + inställning
  - kretfsformning (kompensering)
  - tillståndsåterkoppling + observatör

Design och analys

5. **Regulatordesign:** bestäm $F(s)$ och säkerställ att alla specifikationer är uppfyllda.

    - Design:
        - PID + inställning
        - kretfsformning (kompensering)
        - tillståndsåterkoppling + observatör
    - Analys:
        - poler, rotort, slutvärdessatsen
        - Nyquist / Bode, stabilitetsmarginaler
        - känslighet + robusthet
        - simulering

Om specifikationer ej uppfyllda, gå tillbaks till 4., evt 3, 2 eller 1.

Implementera

6. **Implementera,** dvs. realisera $F(s)$, oftast i dator
    - val av samplingsintervall
    - antialiasfilter
    - diskretisering av styrlag

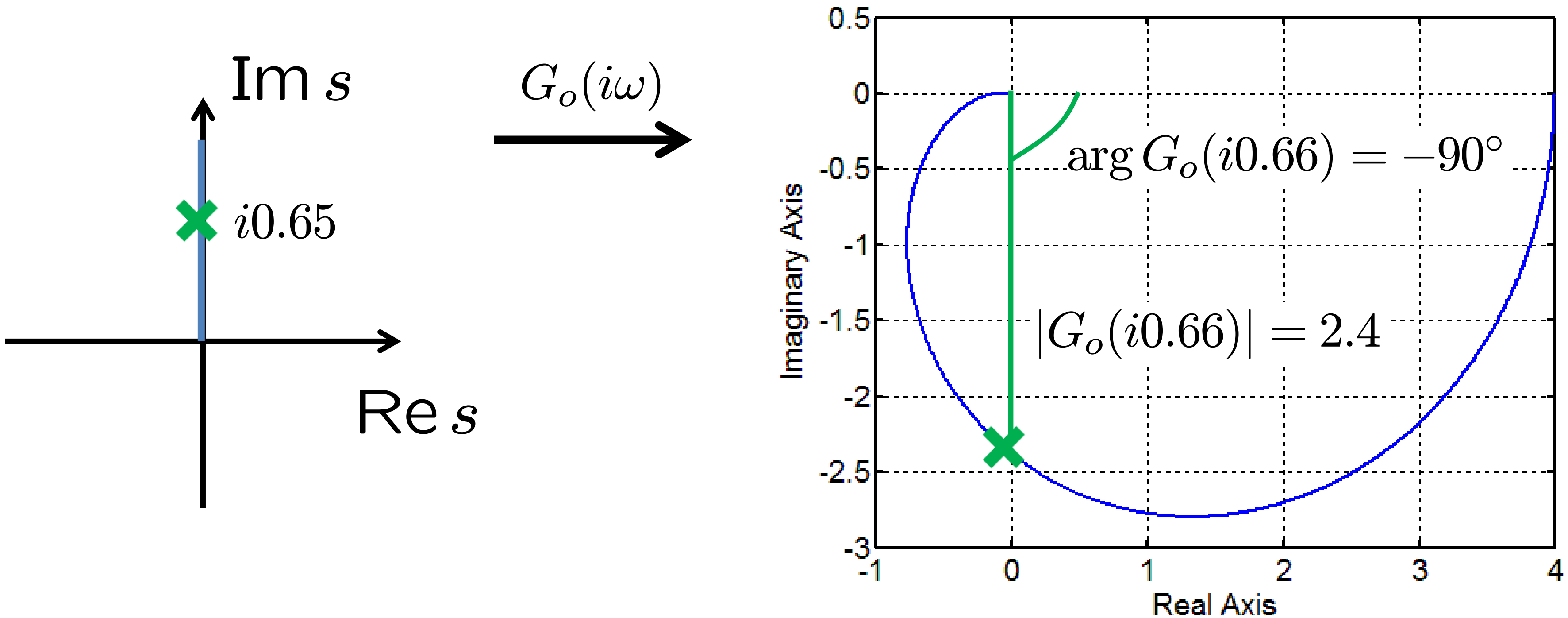
Läsa mer reglerteknik?

- **EL1820 Modelling of dynamical systems, lp1, 6p:** modelling systems from physical relations and experimental observations
- **EL2520 Control Theory and Practice, Advanced course, lp4 , 7.5p:** multivariable systems, control cast as an optimization problem, robustness
- **EL2620 Nonlinear Control, lp2, 7.5p:** analysis and design of nonlinear feedback systems
- **EL2450 Hybrid and embedded control systems, lp3, 7.5p:** embedded control systems, control of and over networks
- **EL2420 Project Course in Automatic Control, Lp2 15p** apply theory on a real system, e.g., robot, helicopter, gyro,...
- **Examensarbete / MSc project:** internal research project or industrial

Tips och repetition inför tentan

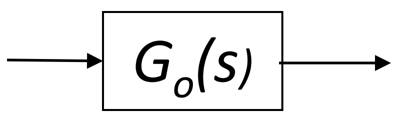
Nyquistkurvan $G_o(s) = \frac{s+4}{(s+1)^3}$

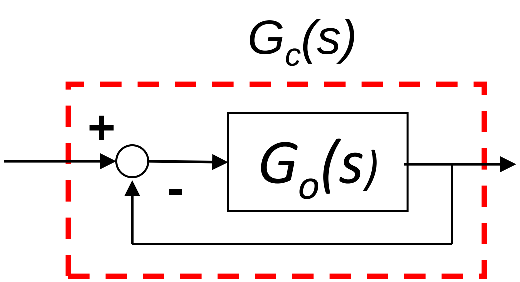
$$\boxed{G_o(i0.65) \approx 2.4e^{-i90^\circ}}$$

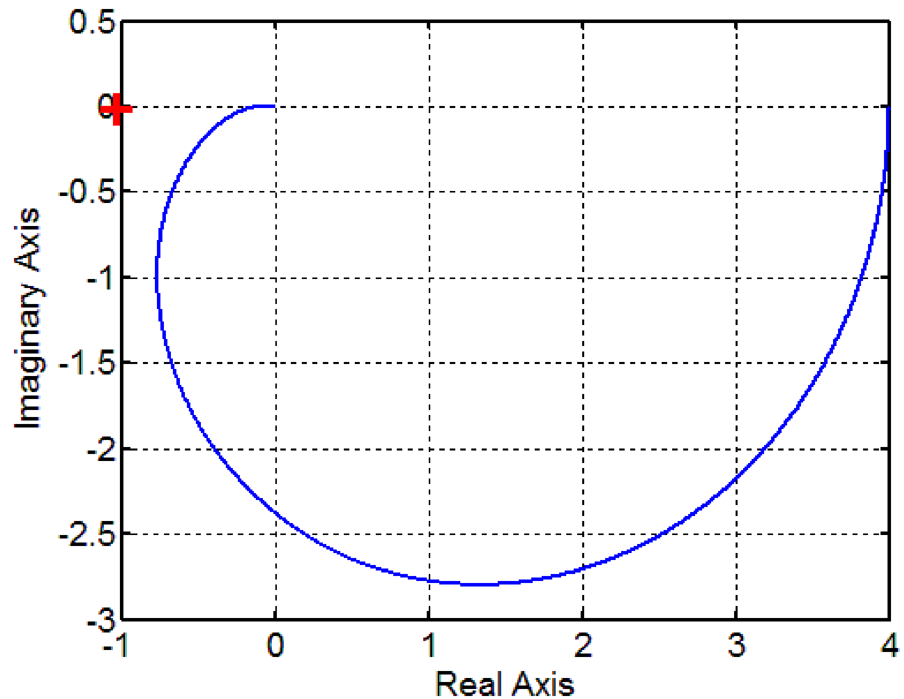


Förenklade Nyquistkriteriet

- Rita bara $G_o(i\omega)$, $0 \leq \omega < \infty$ (*"Nyquistkurvan"*)
- Om $G_o(s)$ är a. stabilt så är $G_c(s)$ a. stabilt om punkten -1 ligger till *vänster* om Nyquistkurvan

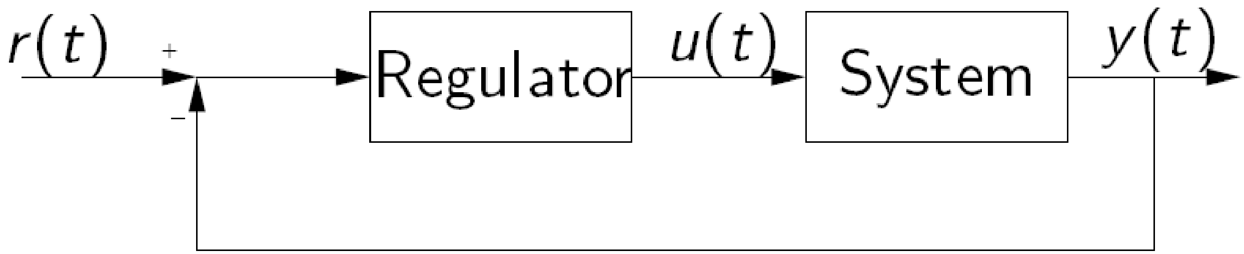






(Om "vänster" svårtolkat: Anv. fullständiga Nyquistkriteriet)

Kompensering (kretsformning)



- specifikationer i tidplanet: stigtid T_r, översläng M, stationärt fel e_0, men: ”svårt” att designa regulator i tidplanet
- enklare: frekvensplanet, översätt specifikationer **stegsvar** $\longrightarrow$ slutna systemets frekvenssvar $G_c(i\omega) \longrightarrow$ öppna systemets frekvenssvar $FG(i\omega)$

Kompensering (kretsformning)

- Översättning (approximativ!!!)

$$T_r \longrightarrow \omega_B \longrightarrow \omega_c$$

$$M \longrightarrow M_p \longrightarrow \phi_m$$

$$e_0 \longrightarrow G_c(0) \longrightarrow FG(0)$$

- **kretsformning:** bestäm $F(s)$ så att $FG(i\omega)$ uppfyller specifikationerna på $\omega_c,\ \phi_m,\ FG(0)$
- oftast iterativ process då översättning av specifikationer är approximativ

Hur forma $F(i\omega)G(i\omega)$?

Specifikationer: snabbhet ω_c, dämpning ϕ_m, stationärt fel $FG(0)$

1. ω_c, dvs.

$$|FG(i\omega_c)| = 1$$

   - räcker med $F = K$, dvs. bestäm K så att $|KG(i\omega_c)| = 1$

Hur forma $F(i\omega)G(i\omega)$?

2. ϕ_m, dvs.

$$\arg FG(i\omega_c) - (-180) = \phi_m$$

- kräver normalt faslyft, dvs. $\arg F(i\omega_c) > 0$
- använd lead-länk

$$F_{lead}(s) = \frac{\tau_D s + 1}{\beta \tau_D s + 1}$$

  ger $\arg F > 0$ om $0 < \beta < 1$
- välj β för önskat faslyft, och τ_D för maximalt faslyft vid $\omega = \omega_c$

Hur forma $F(i\omega)G(i\omega)$?

3. $FG(0)$ stort för litet stationärt fel e_0
   - använd länk med hög förstärkning vid låga frekvenser

$$F_{lag} = \frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s + \gamma}$$

   - parametern γ bestämmer e_0: $F_{lag}(0) = 1/\gamma$
   - parametern τ_I påverkar hur snabbt systemet svänger in mot e_0
   - liten τ_I: snabb insvängning, men betydande negativ fas vid ω_c
4. Juster förstärkningen K så att $|KF_{lead}F_{lag}G(i\omega_c)| = 1$

(Om $F_{lag}(i\omega_c) \approx 1$, så kan K bestämmas redan efter Steg 2.)

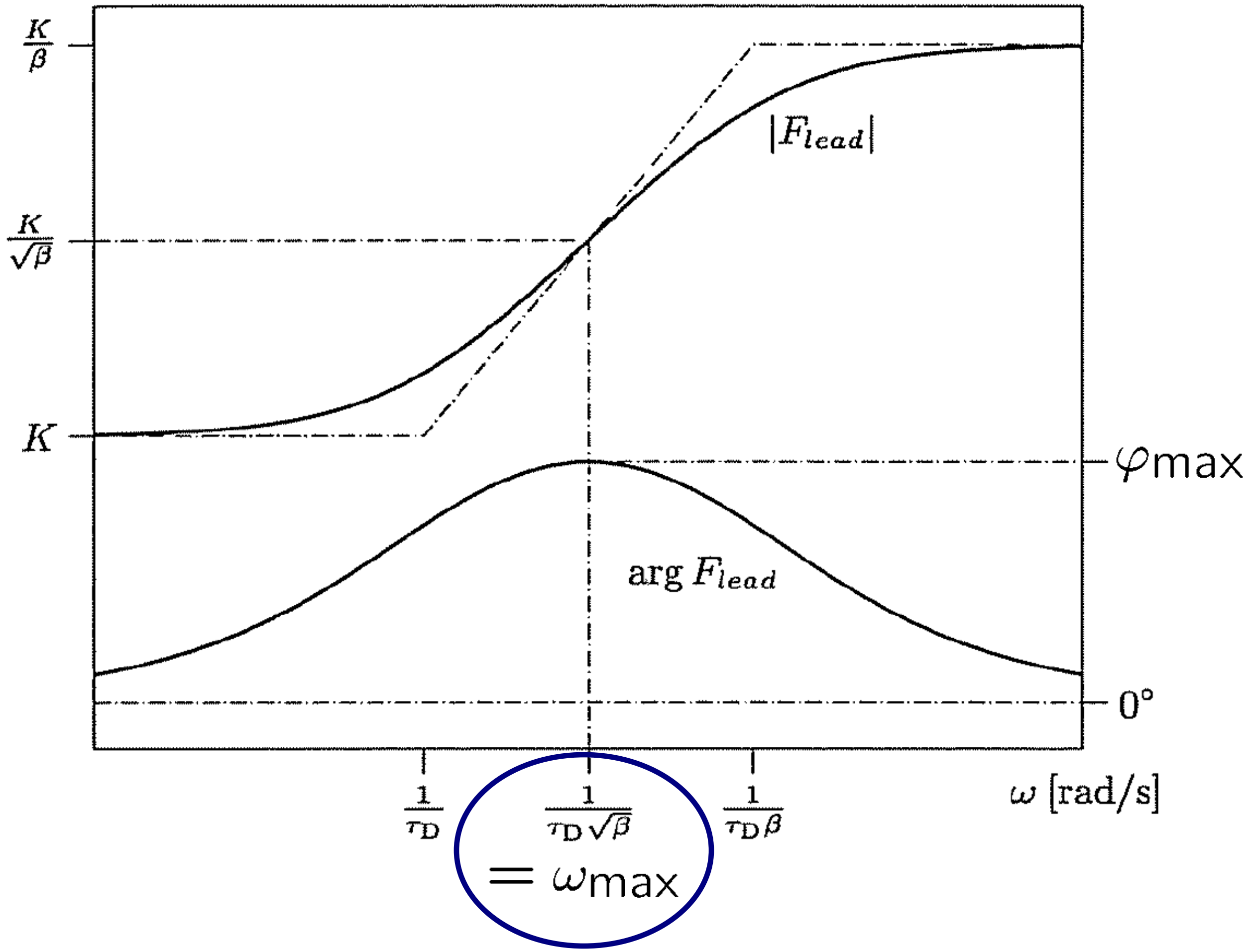
Hur forma $F(i\omega)G(i\omega)$?

Notera!

- kompensera för fasförsämring från F_{lag} genom motsvarande extra faslyft i F_{lead} (Tumregel $\tau_l=10/\omega_c$ minskar fas med 6°)
- $|F_{lead}(i\infty)| = 1/\beta$, dvs. stor förstärkning vid höga frekvenser om β litet (stora faslyft). Inte bra, förstärkar t.ex.mätbrus i styrsignalen.
  lösning: använd flera lead-länker i serie

Exempel på tavlan senare

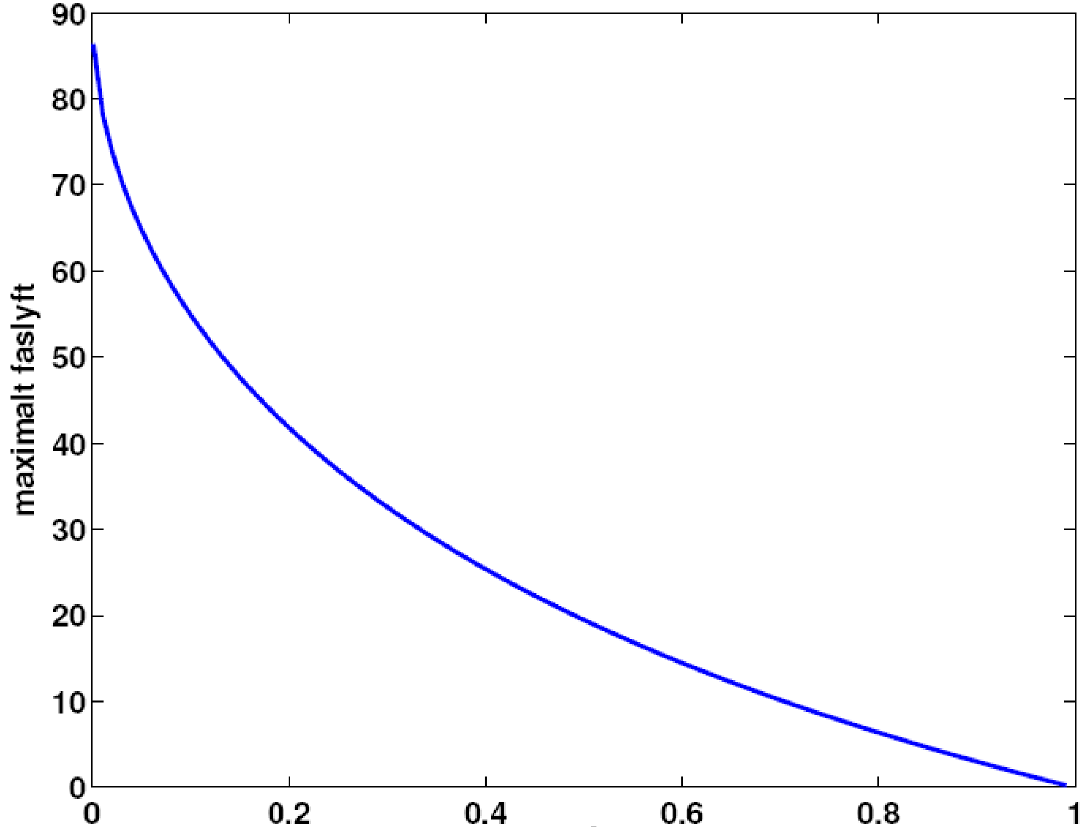
2. Lead-länk (PD-länk)



- fördel: positivt fasbidrag (faslyft)
- nackdel: stor förstärkning vid höga frekvenser

Maximalt faslyft beror på β

φmax

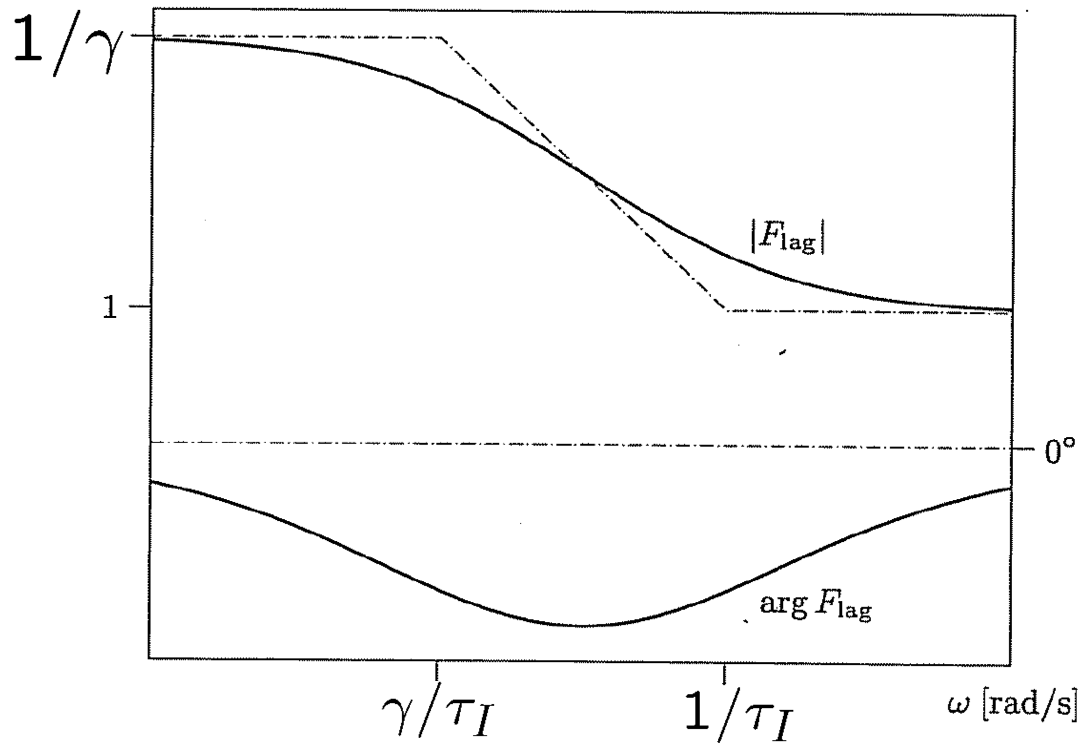


β

1. Bestäm β så att fasökningen blir tillräckligt stor
2. Bestäm τ_D så att $\omega_c = \omega_{\text{max}} (= 1/\tau_D\sqrt{\beta})$
3. Bestäm K så att $|F(i\omega_c)G(i\omega_c)| = 1$

3. Kompensering med lag-länk

$$F_{lag}(s) = \frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s + \gamma}$$



- **Fördel:** Ger stor lågfrekvent förstärkning. Minskar statiskt fel med ungefär faktor *$1/\gamma$* (se nästa slide för exakt analys)
- **Nackdel:** Minskar fasmarginalen. Välj τ_I tillräckligt stort (<u>Tumregel</u>: Välj $\tau_I = 10/\omega_c$ så minskar fasen med 6^o)

Lag-länk och statiskt fel

- Öppet system: $G_\mathrm{o}(s) = KF_\mathrm{lead}(s)F_\mathrm{lag}(s)G(s)$
- Slutet system: $Y(s)=G_\mathrm{c}(s)R(s)$ [$G_\mathrm{c}=G_\mathrm{o}/(1+G_\mathrm{o})$]
- Reglerfel = $e(t) = r(t)-y(t) \mapsto E(s)=R(s)-Y(s)$
- Om slutet system asymptotiskt stabilt:

$$\begin{aligned}\lim_{t\to\infty} e(t) &= \lim_{s\to 0} sE(s) = \lim_{s\to 0} s[R(s) - G_c(s)R(s)] \\ &= \lim_{s\to 0} \frac{sR(s)}{1+G_o(s)}\end{aligned}$$

- Om referens $r(t)$ = steg $\Rightarrow R(s)=1/s$ så

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} \frac{1}{1+G_o(s)} = \frac{1}{1+G_o(0)} = \frac{1}{1+KG(0)/\gamma}$$

Linjärisering

- Givet olinjärt system $$\dot{x} = f(x,u)$$ $$y = h(x,u)$$
- Finn linjär approximation

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

$$\Delta x = x - x_0,\ \Delta u = u - u_0,\ \Delta y = y - y_0$$

Där x_0, u_0 är en stationär punkt (och $y_0 = h(x_0, u_0)$)

Linjärisering

1. Identifiera tillstånd, och finn *f* och *h*
2. Finn stationär punkt. Lös ekvationen:
$$0 = f(x_0, u_0)$$
3. Bestäm y_0 från $h(x_0, u_0)$
4. Beräkna Jacobianerna (vanliga derivator om bara ett tillstånd)
$$A = f_x(x_0, u_0), \qquad B = f_u(x_0, u_0)$$
$$C = h_x(x_0, u_0), \qquad D = h_u(x_0, u_0)$$

Exempel på tavlan

Frågor?