



# EL1000/1120/1110 Reglerteknik AK

Föreläsning 12:  
Sammanfattning





# Kursinfo: Resterande räknestugor

- 141208, 10-12      Q24
  - 141210, 10-12      L21
  - 141215, 10-12      Q34
  - 141215, 13-15      Q11
  - 150114, 10-12      L41
  - 150115, 10-12      L41
  - 150116, 10-12      E33
- 
- Bra tillfällen att få svar på frågor om Lab2, Lab3 och tentan!



# Dagens program

- Kursinfo om lab3 och tentan
- Kort sammanfattning av kursen
- Andra reglerteknikkurser
- Frågor: Pilot-Induced Oscillations
- Övriga frågor
- Ev. några tentatal



## Lab3

- Redovisas på 15 min (inom bokad 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



# Tentan

- Lördag 17/1, kl. 9-14
- Kursbok och räknetabeller (t.ex. beta) OK, men **ej** övningar, extentor, slides, 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.

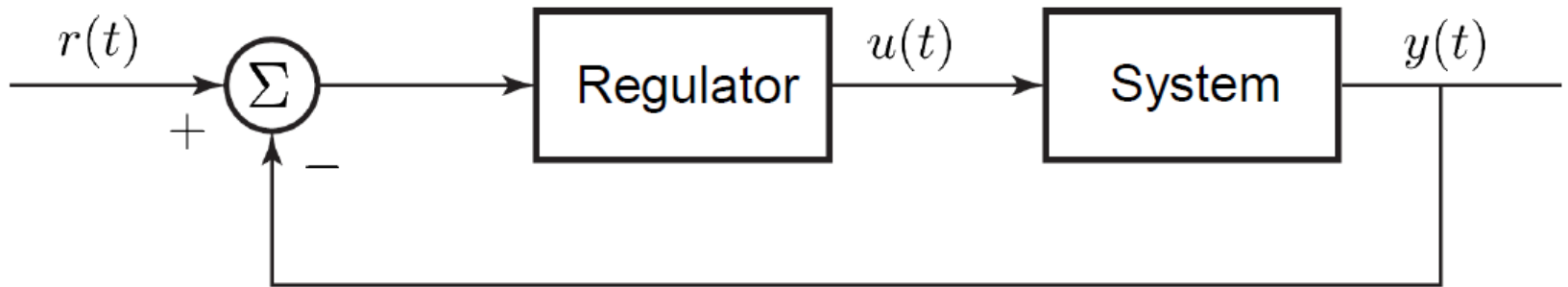
# Reglerteknik



**Reglerteknik:** Att ändra systemegenskaper genom återkoppling!

# Typiskt reglerteknikprojekt

1. **Problem:** Förbättra systemegenskaper genom aktiv styrning, d.v.s. återkopplad reglering



## Syften:

- Stabilitet, robusthet
- Referensvärdesföljning
- Reducera störningskänslighet





# Val av signaler

## 2. Signaler: Vilka variabler ska vi

- Styra  $\rightarrow$  utsignal  $y$  ( $z$  om hänsyn tas till mätbrus)
- Styra med  $\rightarrow$  styrsignal  $u$
- Motverka  $\rightarrow$  störning  $d$
- Mäta  $\rightarrow y$  (ev. även mellansignaler)



# Modellering

**3. Modellering:** Ta fram en matematisk beskrivning av systemets dynamiska beteende, d.v.s. samband mellan styrsignal, störningar och utsignal:

- **Fysikaliska samband:** T.ex. Newtons lagar, Bernoullis lag, etc. Eventuellt följt av linjärisering
- **Experiment:** Samla in data och anpassa modell (systemidentifiering). T.ex. stegsvarexperiment eller frekvenssvarexperiment



# Systembeskrivningar

Beskrivning från linjära differentialekvationer:

- Laplacetransform ger **överföringsfunktion**  $G(s)$
- $s = i\omega$  ger **frekvenssvar**  $G(i\omega)$
- Omskrivning som system av första ordningens differentialekvationer ger **tillståndsform**

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

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



# Specifikationer

**4. Specifikationer:** Vilka prestanda krävs av slutna systemet?

- **Stegsvar:** Stigtid, översläng, insvängningstid, statistiskt fel
- **Frekvenssvar:** Bandbredd, resonanstopp, statistiskt fel, robusthet
- **Tillståndsform:** Polers läge, statistiskt fel



# Design och analys

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

## Design:

- PID
- Kompensering
- Tillståndsåterkoppling (+observatör)

## Analys:

- Poler, rotort, slutvärdessatsen
- Nyquistdiagram, Bodediagram, stabilitetsmarginaler
- Känslighet och robusthetskriteriet
- Simulering
  
- Om specifikationer ej uppfyllda, gå tillbaka till steg 4, och ev. steg 3, 2 och 1



# Implementering

## 6. Implementering: Realisera $F(s)$ , oftast i dator

- Val av samplingsintervall
- Antialiasingfilter
- Diskretisering av styrlag



# Läsa mer reglerteknik?

EL2520 Reglerteknik, fortsättningskurs, period 4

- Multivariabla system, optimal reglering, robusthet

EL2620 Olinjär reglering, period 2

- Olinjäriteter i reglering

EL2450 Hybrida och inbyggda reglersystem, period 3

- Implementering och styrning över nätverk

EL1820 Modellering av dynamiska system, period 1

- Modelleringsprinciper och systemidentifiering

EL2745 Principer för trådlösa sensornätverk, period 1

- Distribuerade algoritmer och protokoll

EL2421 Reglerteknik, Projektkurs, period 2

- Genomför ett helt reglerteknikprojekt

- Examensarbete

# Fråga: Pilot-Induced Oscillations (PIO)



<https://www.youtube.com/watch?v=4iToQ2Fykol>

Går detta att förstå efter att ha läst Reglerteknik AK?



# Fråga: Pilot-Induced Oscillations (PIO)

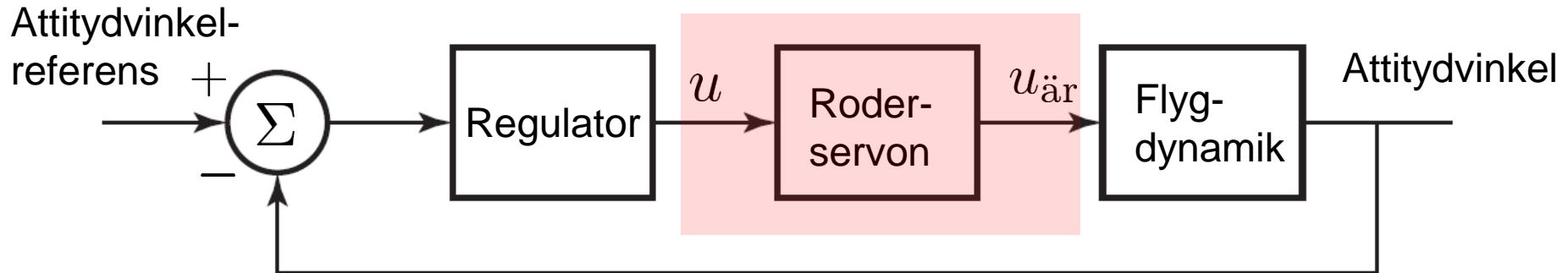


$$\Theta(s) = \frac{-1.53(s - 318.4)(s + 1.399)}{s(s - 1.115)(s + 3.585)(s + 20)}U_1(s) + \frac{0.4(s + 417.6)(s + 1.266)}{s(s - 1.115)(s + 3.585)(s + 20)}U_2(s)$$

(Fart: Mach 0.6, höjd: 1000 m)

Instabilt system **och** icke-minfassystem!

# Fråga: Pilot-Induced Oscillations (PIO)



- Under vissa förutsättningar hinner inte roderservona att följa de kommandon som ges från regulatorn, d.v.s.  $u \neq u_{\text{är}}$
- Roderservon har "rate limits" (en typ av olinjäritet). Om regulatorn inte tar hänsyn till dessa på ett bra sätt kan extra fasförlust i reglerloopen skapas när attitydvinkelreferensen ändras snabbt



# PHASE COMPENSATION OF RATE LIMITERS IN UNSTABLE AIRCRAFT

Lars Rundqwist and Karin Ståhl-Gunnarsson

Saab Military Aircraft, S-581 88 Linköping, Sweden

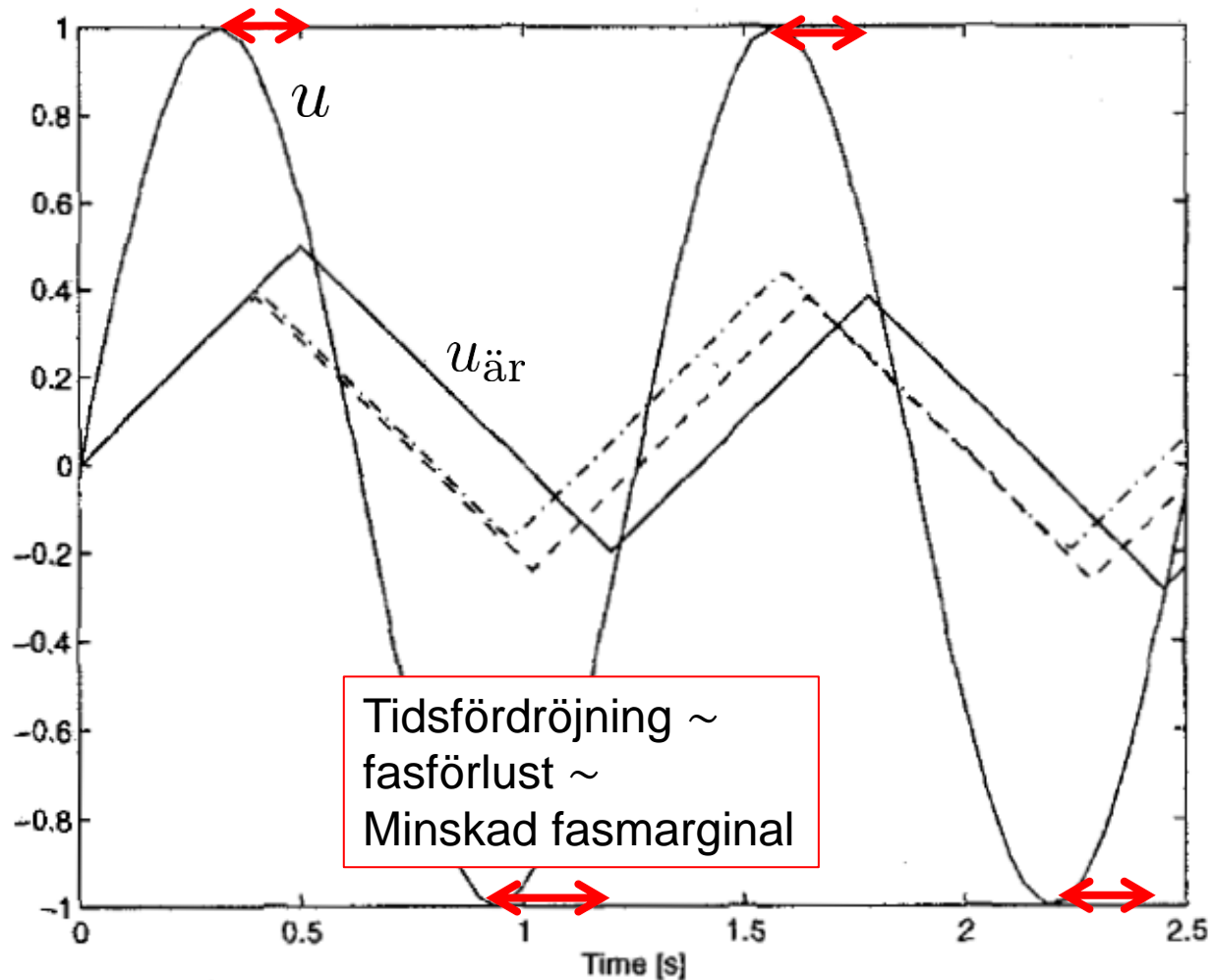
*larru@weald.air.saab.se, kasta@weald.air.saab.se*

## Abstract

For a modern aerodynamically unstable fighter, like the JAS 39 Gripen, the flight control system typically provides 45° phase margin. Therefore rate limiting of control surfaces, which may cause large phase shifts, is an important issue. Software rate limiters are placed on the control servo commands in order to prevent the hydraulic servos from rate limiting. When a rate limiter is saturated, the phase shift drastically reduces the stability margins of the closed loop and increases the risk for pilot-induced oscillation (PIO). This paper describes a novel method for compensating the phase shift of a rate limiter. In contrast to earlier phase compensation methods, this method uses feedback instead of logic or feedforward. Open loop and closed loop properties of the method are discussed. The method gives a drastic improvement on stability margins and reduces PIO tendencies.

limiting has been observed on many modern military and civil aircraft, and some of these PIO incidents have led to loss of control.

Before getting into the details of phase compensation of rate limiters, it may be interesting to first discuss why this approach is chosen in flight control systems. In general the control community deals with fully automatic systems, where the control law is completely specified. Here we instead have a human pilot as part of the control loop, and a pilot is not a linear time-invariant controller. Instead a pilot uses different control techniques, depending on the task, etc. This can be interpreted as different gains and bandwidths, different amounts of phase lead or lag, and sometimes bang-bang types of control. The pilot needs an aircraft response within roughly known limits in order to be able to control it properly. If the aircraft response satisfies such limits, stability and good performance is predicted



**Figure 6.** Responses to  $u = \sin(5t)$  for a conventional rate limiter (solid), rate limiter with feedback (dashed) and rate limiter with feedback and bypass (dash-dotted).



Phase compensation of rate limiters has been one of the keys in obtaining good and safe performance and handling qualities of the JAS 39 Gripen. Extensive analysis, simulations and flight tests have been carried out to ensure that rate limiting is no threat to the good handling qualities of the JAS 39 Gripen. The FCS editions yield high authority, accuracy, and good predictability for both small and large stick inputs and are now qualified for production use.

Using the novel methods above, the pilot will not get the full response during rate limiting but, quoting one of the JAS 39 Gripen test pilots, "you get a natural reduction of the response and you are never out of control". The reason is that when the pilot moves the stick in the other direction, the aircraft responds to his command without noticeable time delay.

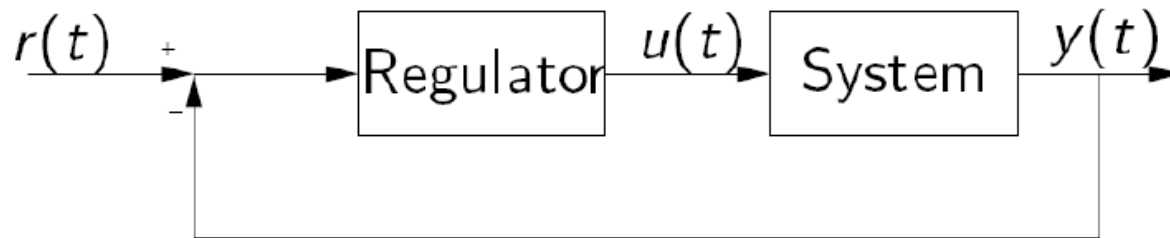
It should be pointed out that rate limiting should not take place during normal tasks. But a pilot is capable of making surprisingly fast stick movements during special circumstances. Instead of reducing the forward gain in order to avoid rate limiting, it is now possible to use phase compensated rate limiters as a safety against fast stick input, but still keeping feedforward gains relatively high, which preserves a high agility of the aircraft.

- [7] Gelb, A., and W. E. Vander Velde (1968) *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design*, McGraw-Hill, New York.
- [8] Rundqwist, L. (1996) "Rate limiters with phase compensation" Proceedings of 20th Congress of ICAS, Sept. 8-13, 1996, Sorrento, Italy.
- [9] Rundqwist, L., and R. Hillgren (1996) "Phase compensation of rate limiters in JAS 39 Gripen", *AIAA Paper 96-3368*.
- [10] Gibson, J. C. (1991) "The development of alternative criteria for FBW handling qualities", AGARD-CP-508.



**Övriga frågor?**

# Kompensering



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



# Kompensering

- Översättning (approximativ!!!)

$$T_r \rightarrow \omega_B \rightarrow \omega_c$$

$$M \rightarrow M_p \rightarrow \phi_m$$

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

- **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  $\omega_c$ , dämpning  $\phi_m$ , stationärt fel  $FG(0)$

1.  $\omega_c$ , 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.  $\phi_m$ , 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  $\beta$  för önskat faslyft, och  $\tau_D$  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  $\gamma$  bestämmer  $e_0$ :  $F_{lag}(0) = 1/\gamma$
- parametern  $\tau_I$  påverkar hur snabbt systemet svänger in mot  $e_0$
- liten  $\tau_I$ : snabb insvängning, men betydande negativ fas vid  $\omega_c$

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.)

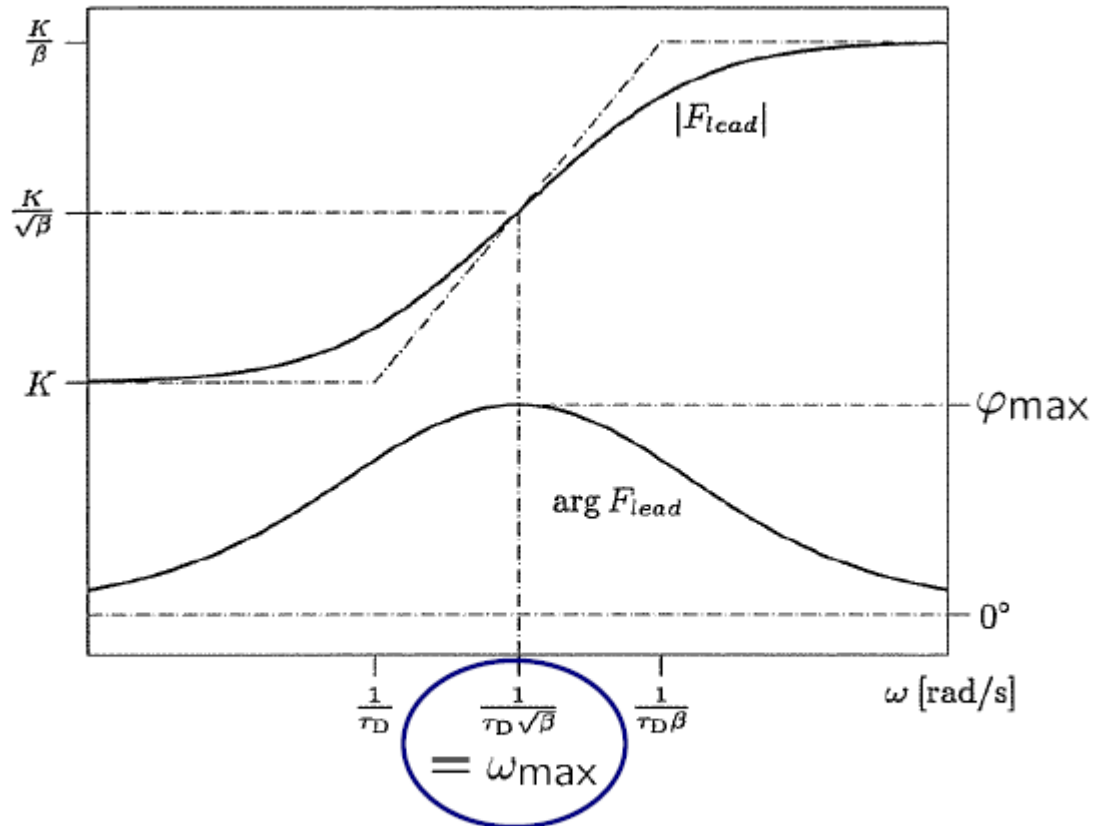


## Hur forma $F(i\omega)G(i\omega)$ ?

Notera!

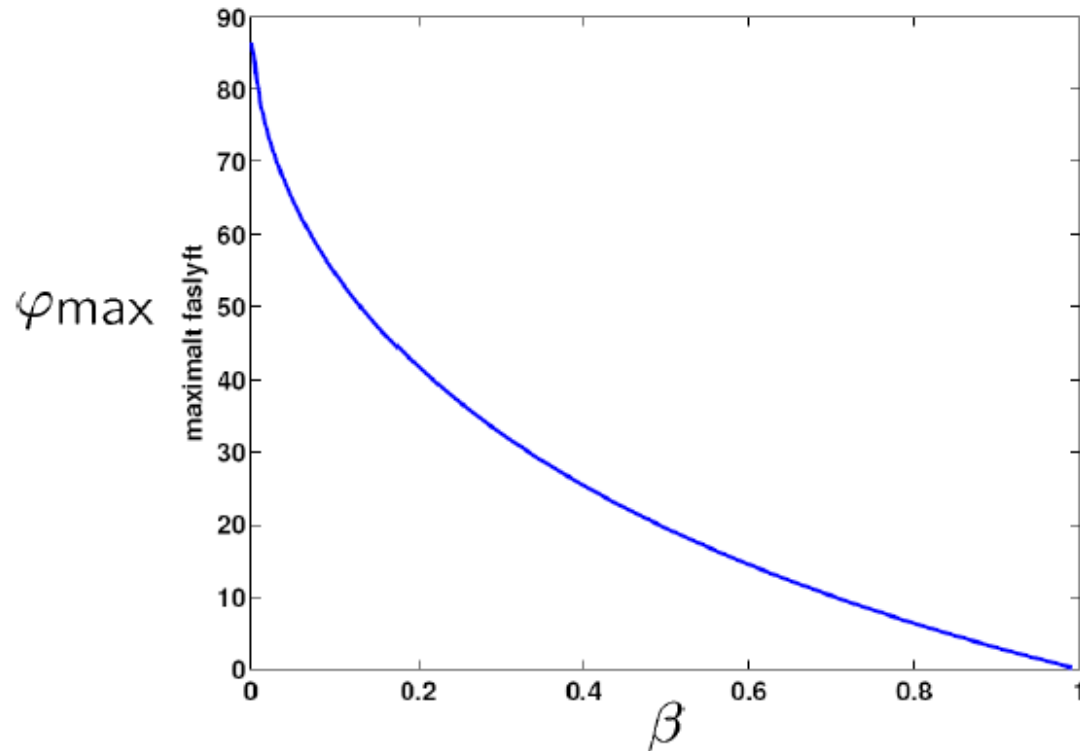
- kompensera för fasförsämring från  $F_{lag}$  genom motsvarande extra faslyft i  $F_{lead}$  (Tumregel  $\tau_l = 10/\omega_c$  minskar fas med  $6^\circ$ )
- $|F_{lead}(i\infty)| = 1/\beta$ , dvs. stor förstärkning vid höga frekvenser om  $\beta$  litet (stora faslyft). Inte bra, förstärkar t.ex.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

# Lead-länk (PD-länk)



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

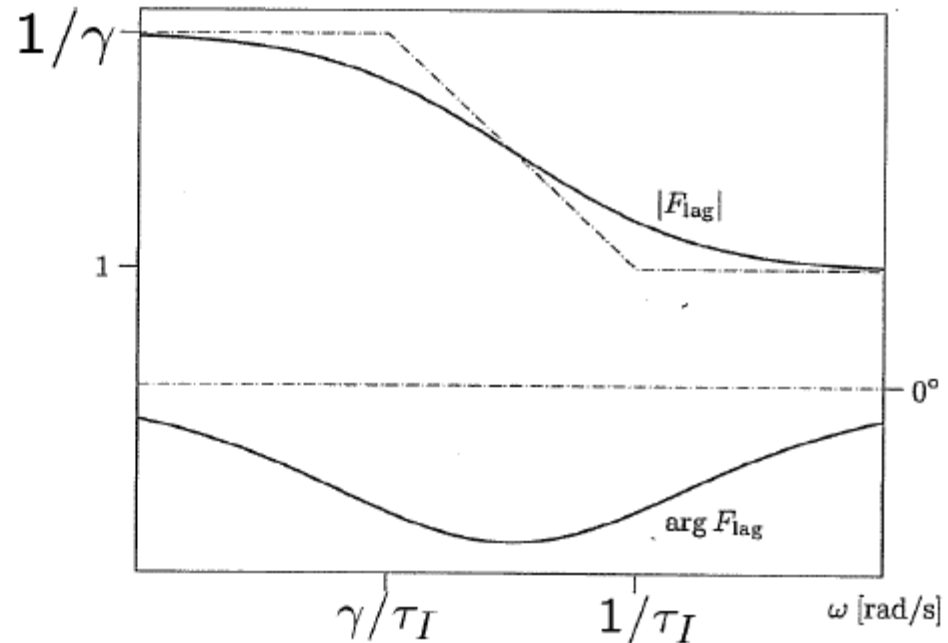
# Maximalt faslyft beror på $\beta$



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

# Lag-länk

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



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



## Lag-länk och statistiskt fel

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

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

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

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