



EL1000/1120/1110 Reglerteknik AK

Föreläsning 11: Implementering





Kursinfo: Administration

- För frågor kring Bilda, labbanmälan, kurshemsida, etc.: kontakta Anneli Ström annelist@ee.kth.se (Hanna är sjukskriven)
- För frågor kring resultatrapportering, registreringar, kursmaterial: kontakta som innan STEX stex@ee.kth.se



Kursinfo: Resterande kursprogram

- Föreläsning 11 (idag): Implementering
 - Efter föreläsningen kan de som vill besöka vårt fordonslabb.
 - Även möjligt att besöka labbet på måndag kl. 10 efter föreläsning 12
- Föreläsning 12 (8 december): Sammanfattning
 - Repetition enligt önskemål
 - Skicka önskemål till hsan@kth.se senast idag
 - Lösning av tentatal



Dagens program

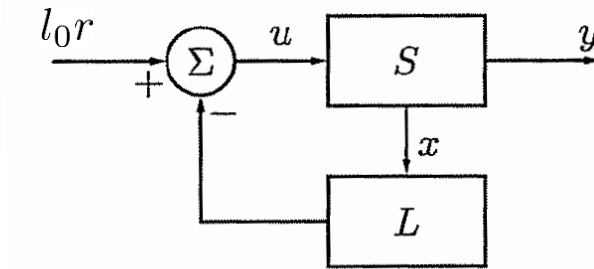
- Tillståndsåterkoppling med observatör (repetition, slides)
- Kaskadregulator (repetition, slides)
- Implementering (slides, tavlan)

Tillståndsåterkoppling (Föreläsning 9)

- Antag att vi kan mäta alla tillstånd x . Återkoppla med allt vi kan mäta!

$$u(t) = -Lx(t) + l_0 r(t)$$

$$L = (l_1 \quad \dots \quad l_n)$$

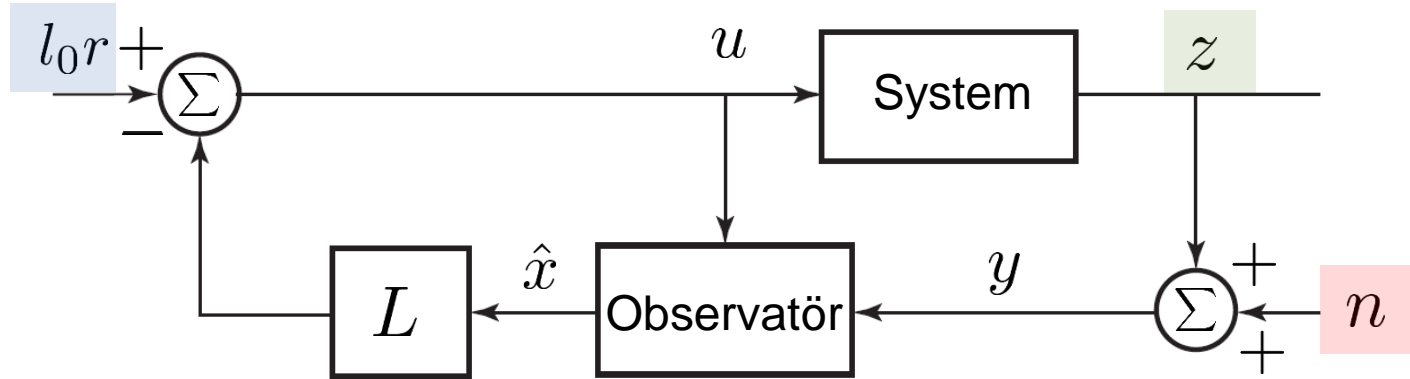


Slutna systemets poler ges av $\det(sI - A + BL) = 0$

- n ekvationer och n obekanta (L)
- Lösbart ekvationssystem om S styrbart
- Polerna (egenvärdena) kan läggas var du vill!

$$G_c(s) = C(sI - A + BL)^{-1} B l_0$$

Tillståndsåterkoppling med observatör



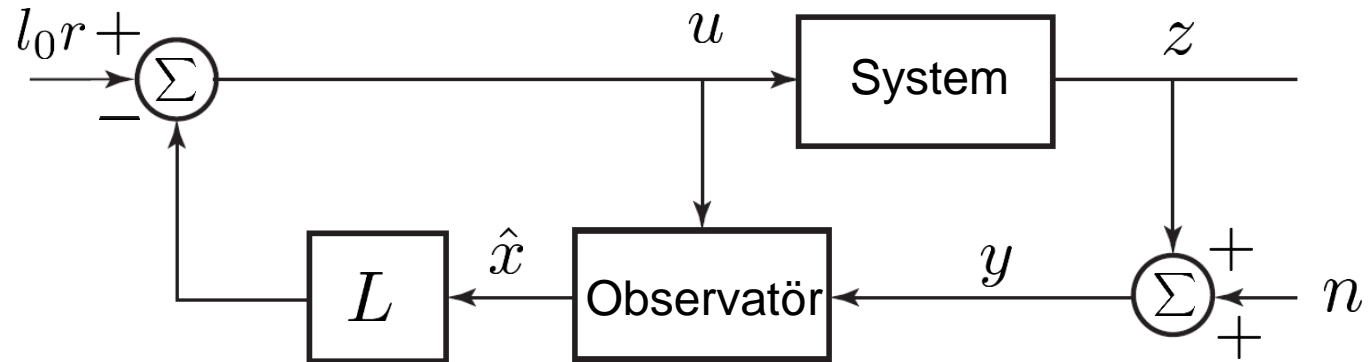
$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A - BL & BL \\ 0 & A - KC \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \tilde{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} l_0 r - \begin{pmatrix} 0 \\ K \end{pmatrix} n$$

$$z = (C \quad 0) \begin{pmatrix} x \\ \tilde{x} \end{pmatrix}$$

$$Z(s) = G_c(s)R(s) + (G_c(s)/l_0)L(sI - A + KC)^{-1}KN(s)$$

Separationsprincipen!

Tillståndsåterkoppling med observatör



Arbetsgång med hjälp av separationsprincipen:

1. Forma först $G_c(s)$ med val av L och l_0
2. Välj K i observatören efter studier av mätbrus, störningar och modellfel (jämför med robusthet och känslighet i Föreläsning 6-7)

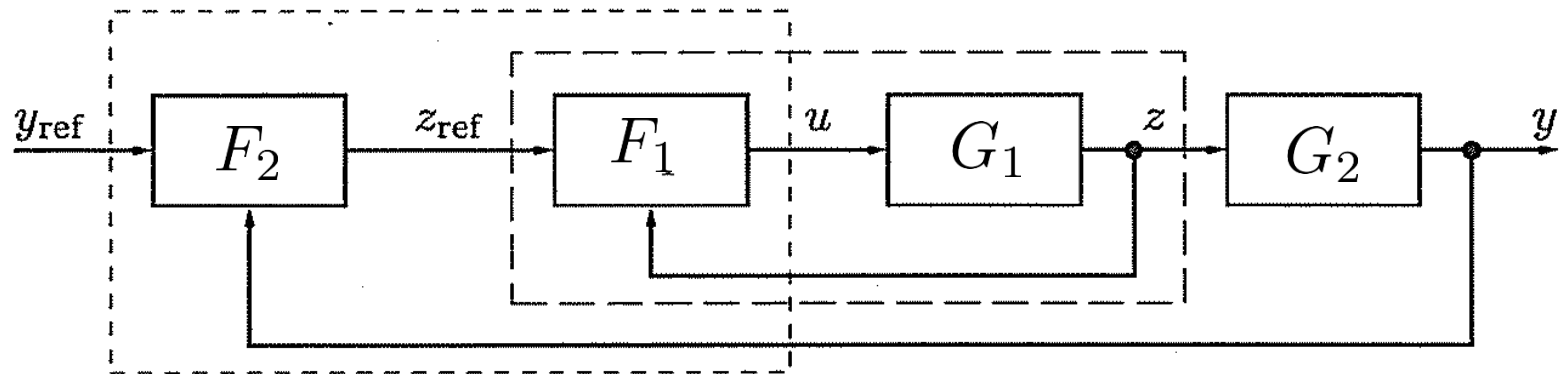


Regulatorer hittills i kursen

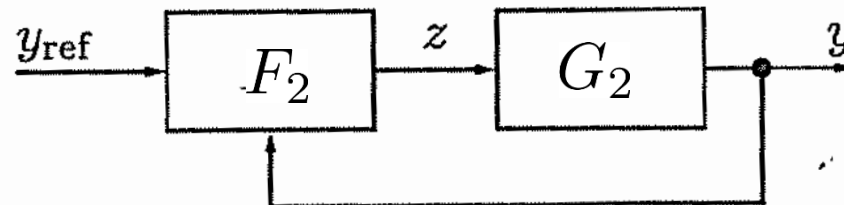
- **PID**
 - Enkel och vanlig. Räcker inte alltid.
- **Kompensering**
 - "Ingenjörsmässig", automatiskt robust (fasmarginal), regulator av låg ordning, design lite av en konststart
- **Tillståndsåterkoppling + observatör**
 - Separationsprincipen, samma metod för flera in- och utsignaler, ingen automatisk robusthet, regulator av hög ordning
- **Specialregulatorer**
 - Kaskadregulator (mätbar mellansignal)
 - Framkoppling (mätbar störning, se övning)
 - Smith-prediktor (känd tidsfördröjning)

Kaskadreglering

- Kan mäta "mellansignal" z



- Välj inre regulatorn F_1 så att $z(t) \approx z_{\text{ref}}(t)$ (gör inre loopen tillräckligt snabb. Tumregel: 5 gånger snabbare)
- Ger förenklat reglerproblem för yttre loopen:



Exempel 1: Rategyroåterkoppling (Fö. 10)

$$G_1(s) = \frac{1}{s+1}, \quad G_2(s) = \frac{1}{s}, \quad F_1 = K_1, \quad F_2 = K_2$$

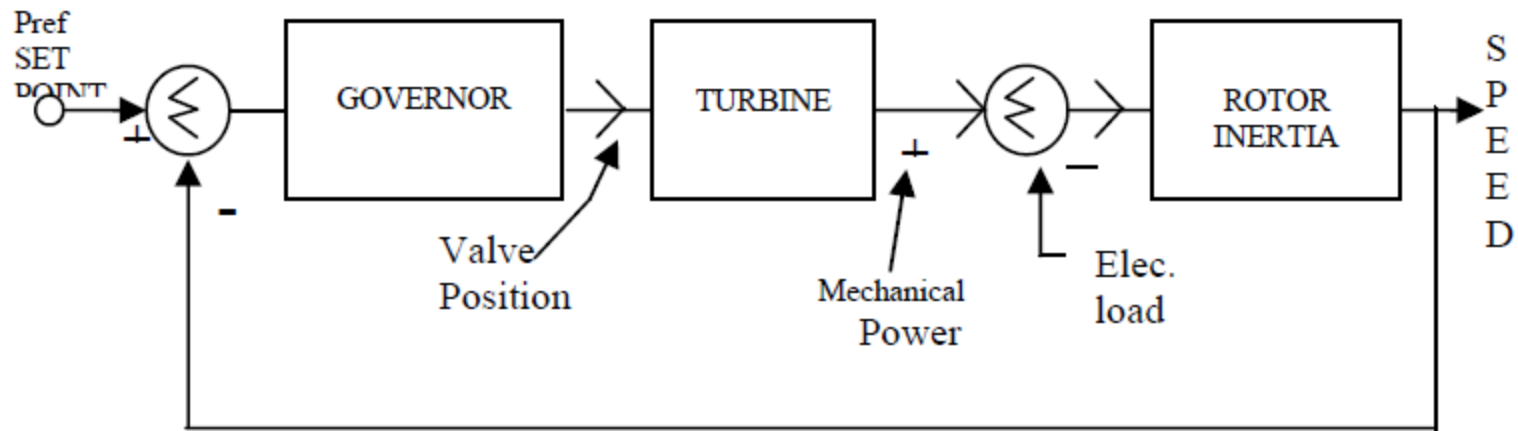
- Överföringsfunktion från y_{ref} till y :

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{K_1 K_2}{s^2 + (K_1 + 1)s + K_1 K_2} Y_{\text{ref}}(s) \\ &= \frac{K_2}{\frac{1}{K_1} s^2 + \frac{K_1 + 1}{K_1} s + K_2} Y_{\text{ref}}(s) \approx \frac{K_2}{s + K_2} Y_{\text{ref}}(s) \end{aligned}$$

- Approximation gäller om K_1 är stor i förhållande till $s = i\omega$ (y_{ref} frekvens) och K_2 (K_1 vald enligt tumregel!)
- Under dessa villkor "syns" ej inre loopen i utsignalen y !
- Smart utnyttjande av mellansignalen förenklar reglerdesign. Förutsätter möjlighet för tidskaleseparation av dynamiken

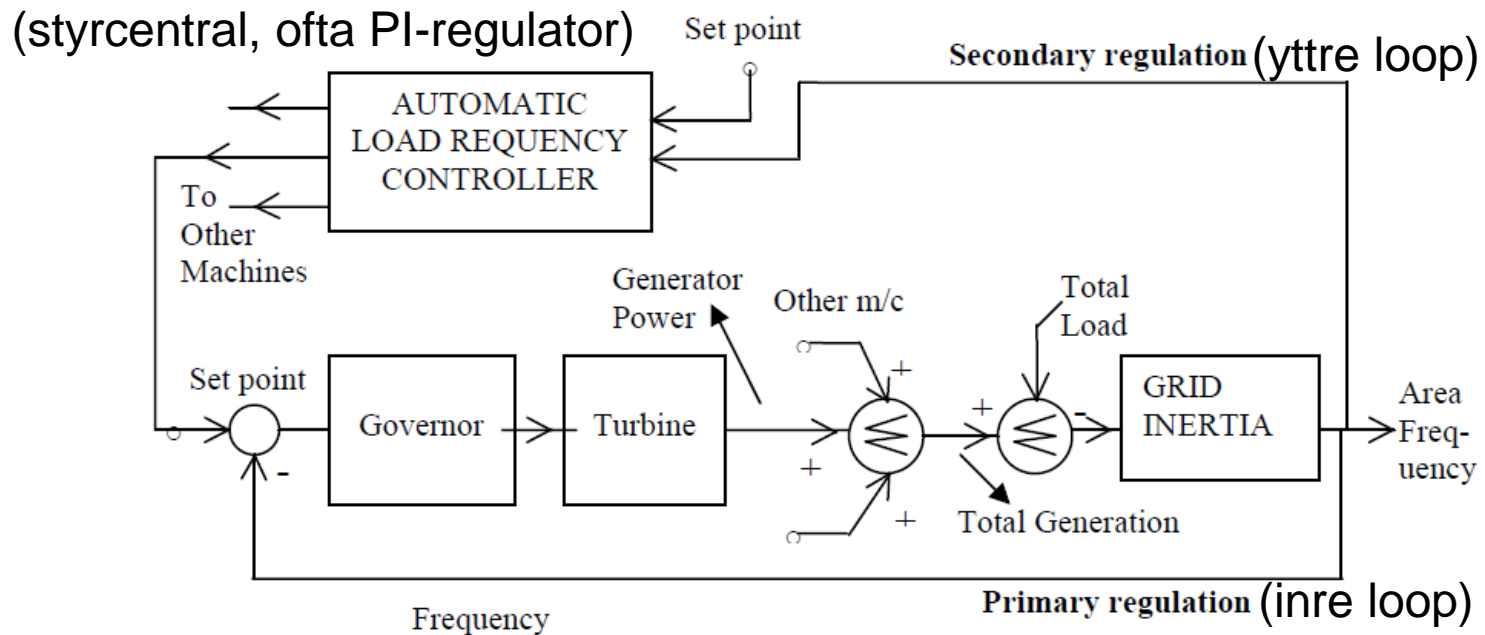
Exempel 2: Automatic Generation Control

- Hur håller elnätet frekvensen 50 Hz? Genom kaskadreglering av alla generatorer!
- Inre loop för en generator:



Exempel 2: Automatic Generation Control

- Hur håller elnätet frekvensen 50 Hz? Genom kaskadreglering av alla generatorer!
- Inre och yttre loop:



Exempel 2: Automatic Generation Control

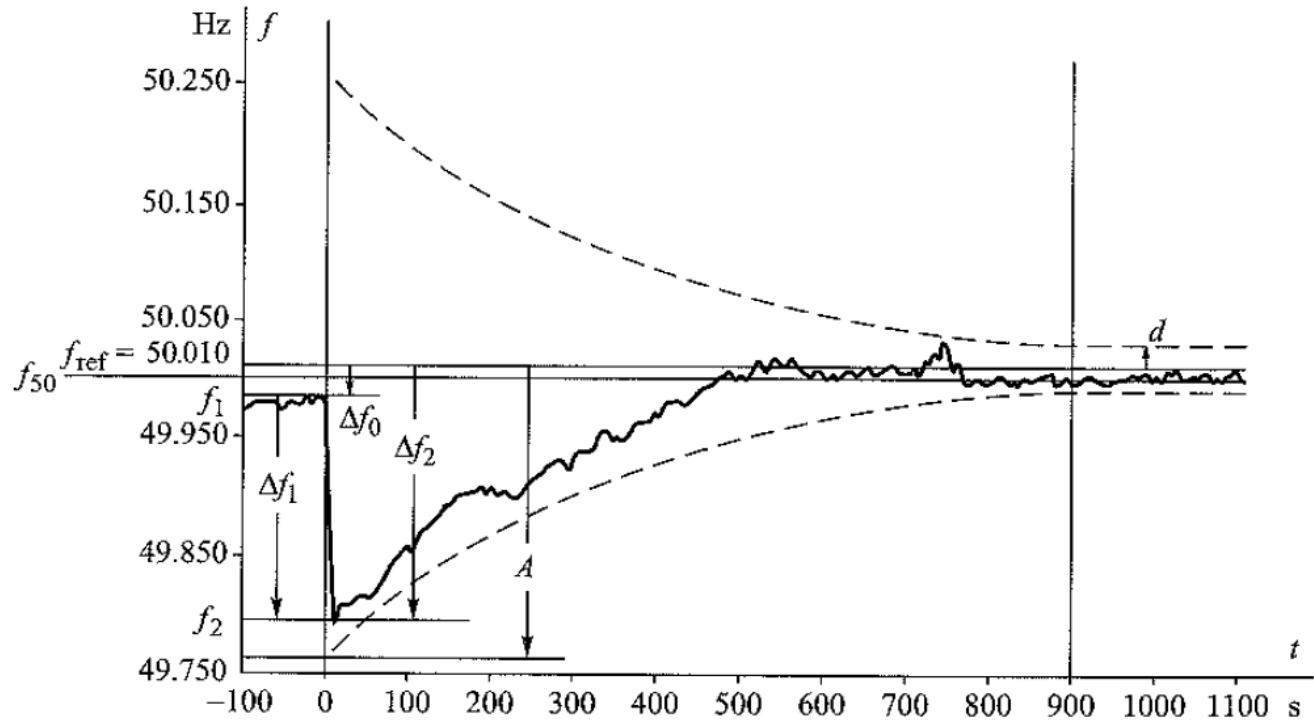


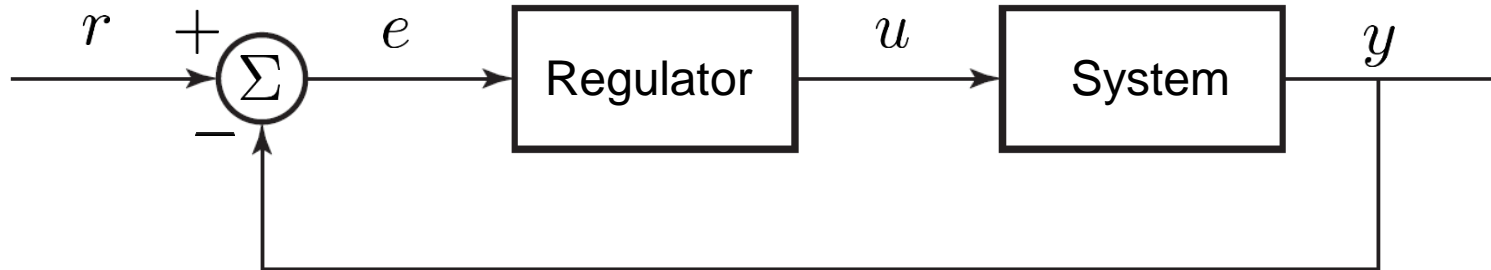
Figure 9.13 Illustration of the quality assessment of frequency control using a trumpet characteristic. Based on the document 'UCTE – Ground Rules – Supervision of the application of rules concerning primary and secondary control of frequency and active power in UCTE'. Reproduced by permission of UCTE.



Dagens program

- Tillståndsåterkoppling med observatör (repetition, slides)
- Kaskadregulator (repetition, slides)
- **Implementering (slides, tavlan)**

Implementering

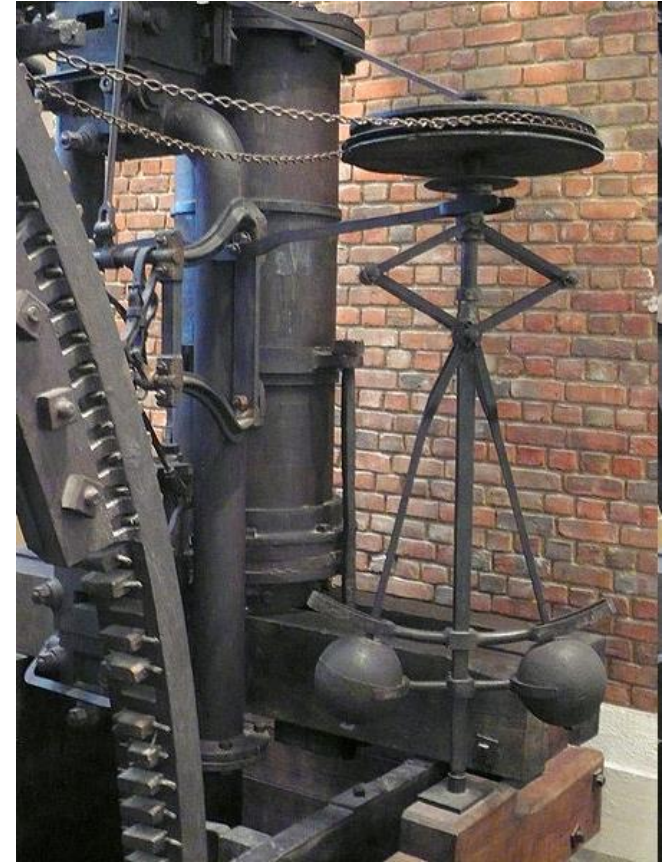
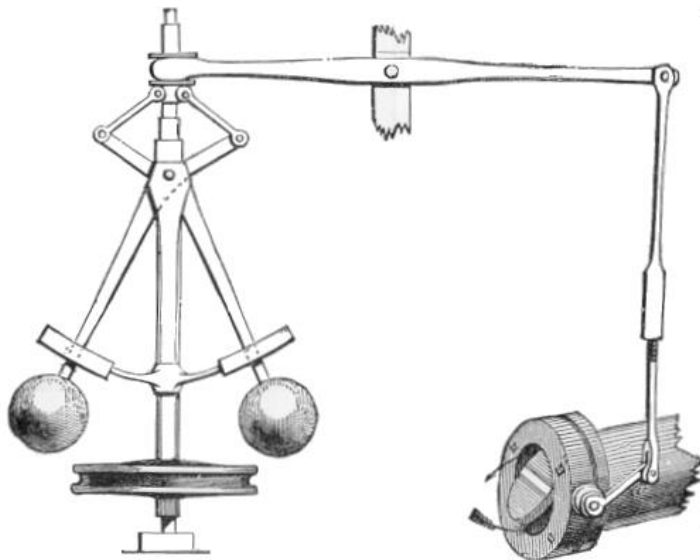


Hur förverkliga sambandet ($F(s)$) mellan $e(t)$ och $u(t)$?

- **Analogt:** mekanik, elektronik, pneumatik. Signaler representeras av spänningar, tryck, etc.
- **Digitalt:** programmering. Signaler representeras av tal i en dator.

Centrifugalregulatorn

- Mekanisk P(I)-regulator
- James Watt, 1788



Centrifugalregulatorn

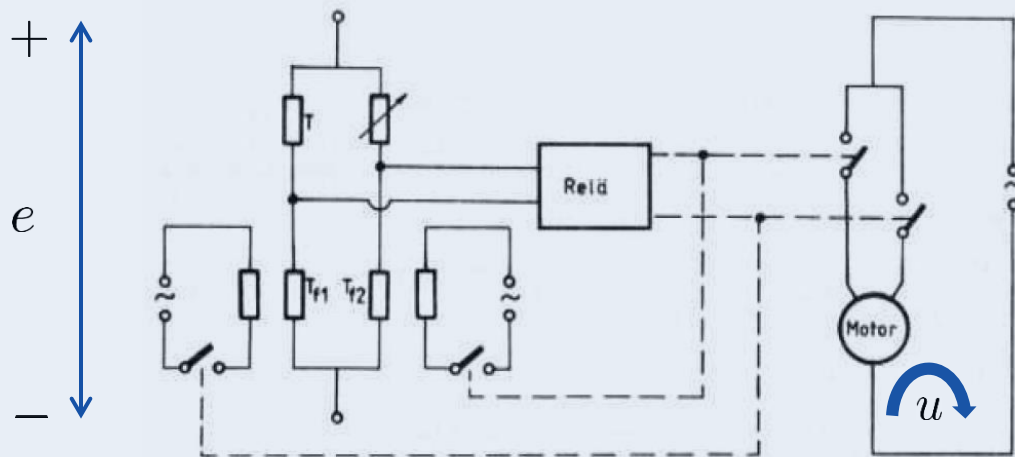
Empire bensinmotor (2 hk) från 1918



Billmans elektriska PI-regulator

- Stig Billman, civ. ing. KTH 1929, exjobb: "Termiska förlopp vid temperaturregulatorer"
- Grundade Billmanregulator AB 1932 (nu del av Siemens BT)

Termistorer + vridresistor + relä + elmotor \approx PI-regulator



[Åström: [Early Development of Automatic Control in Sweden](#), 2013]



Varför digital implementering?

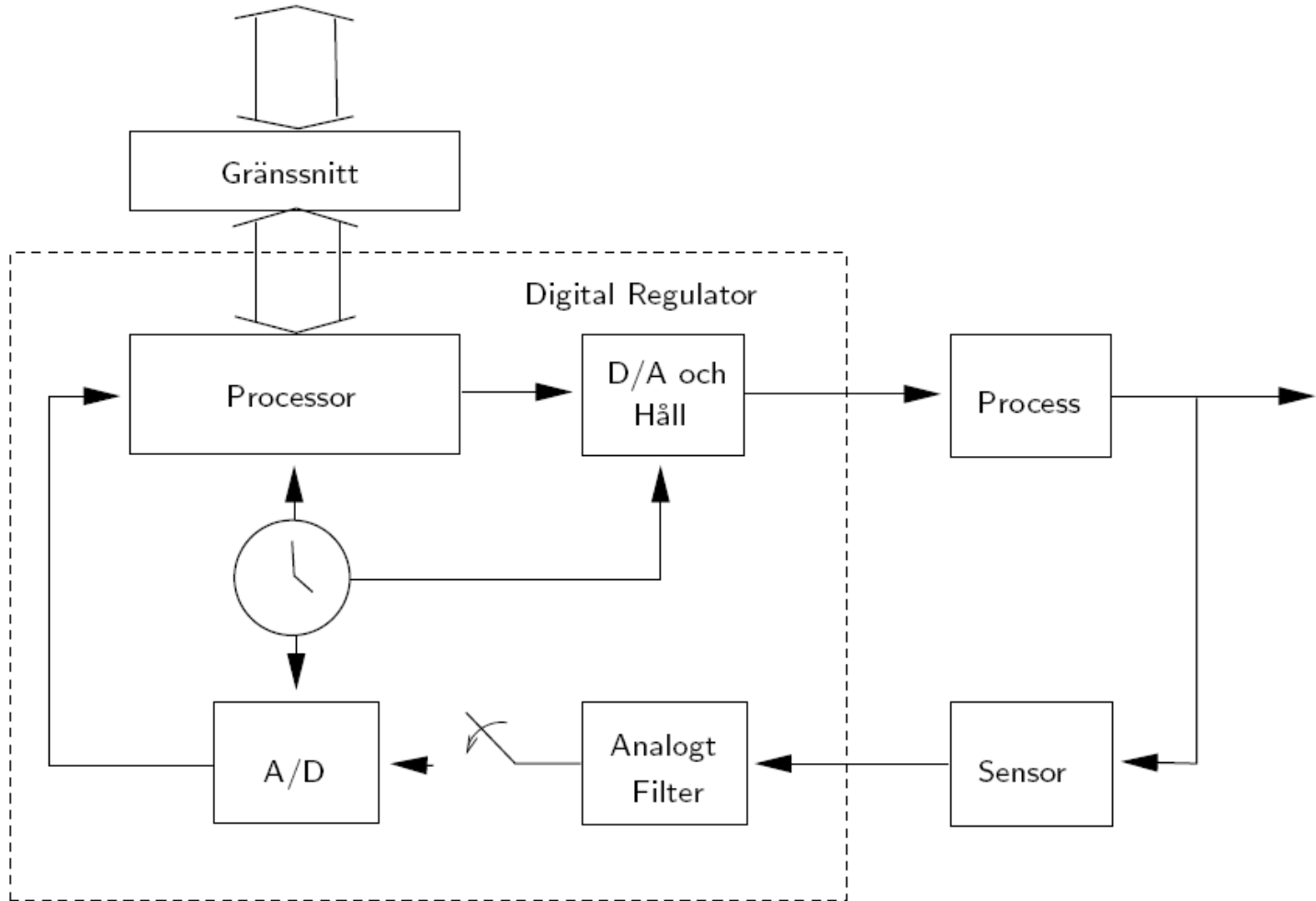
Fördelar:

- Billigt
- Flexibelt
- Kan realisera komplicerade samband

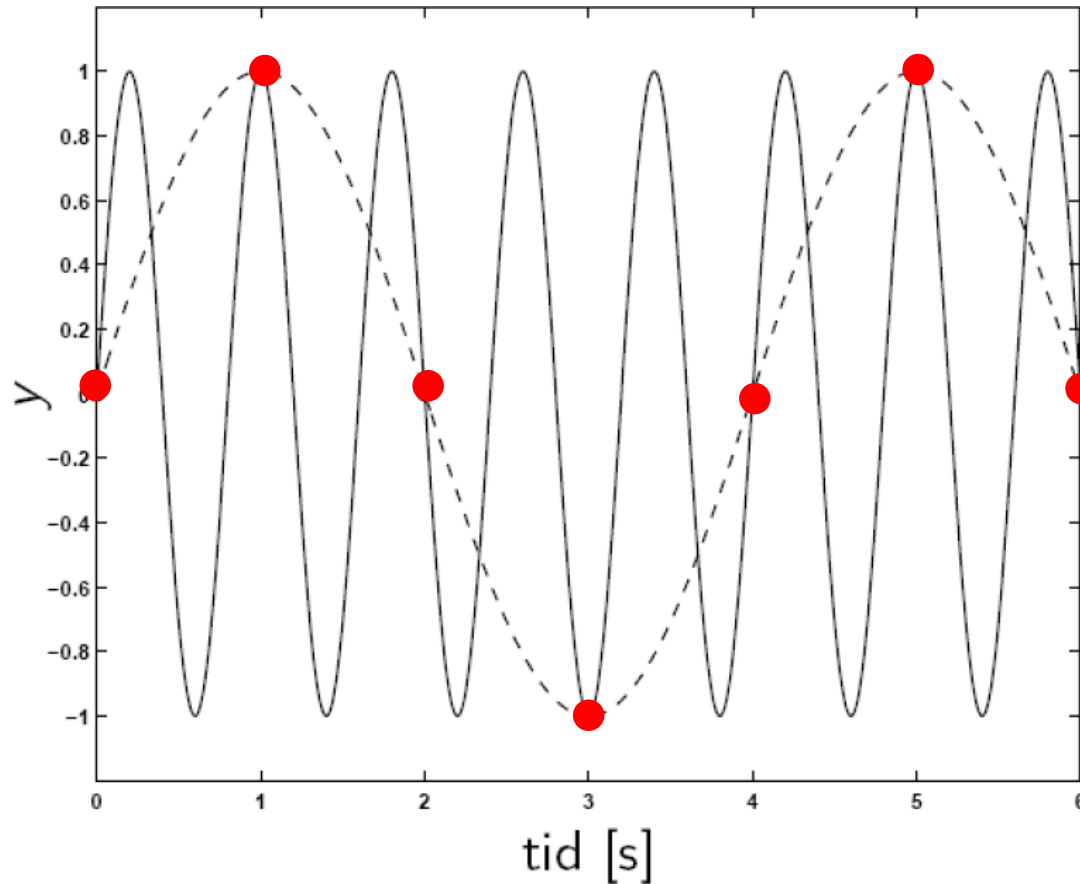
Nackdelar:

- Måste approximera $F(s)$
- Kan ge sämre prestanda
- Kräver särskild teori ("digital reglering")

Hur ser den digitala implementeringen ut?



Aliaseffekten

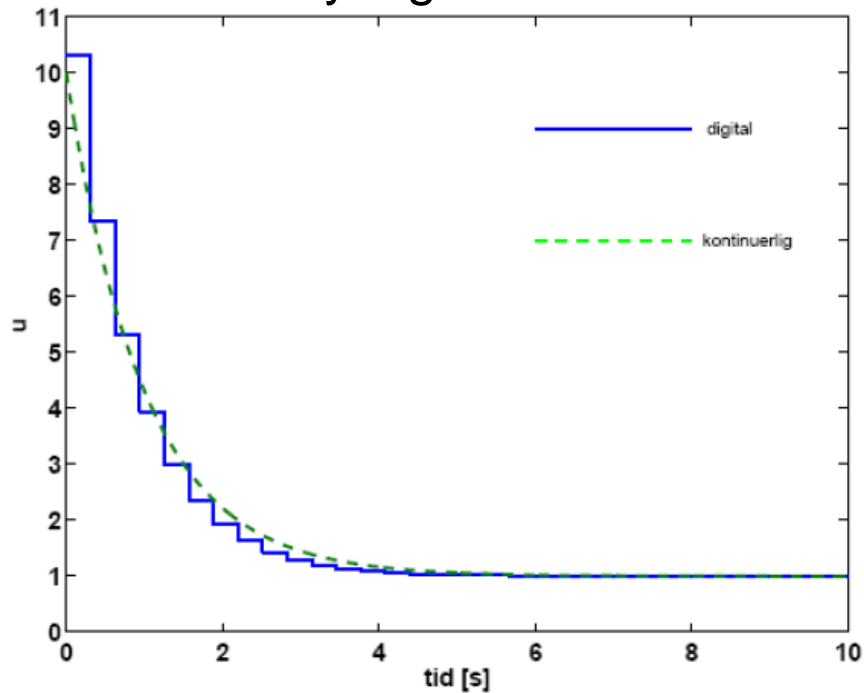


Signal med frekvens $\omega = 2.5\pi$ rad/s uppfattas som signal med frekvens $\omega = 0.5\pi$ rad/s! (Samplingsperiod $T = 1$ s, Nyquistfrekvens $\omega_N = \frac{\pi}{T} = \pi$ rad/s)

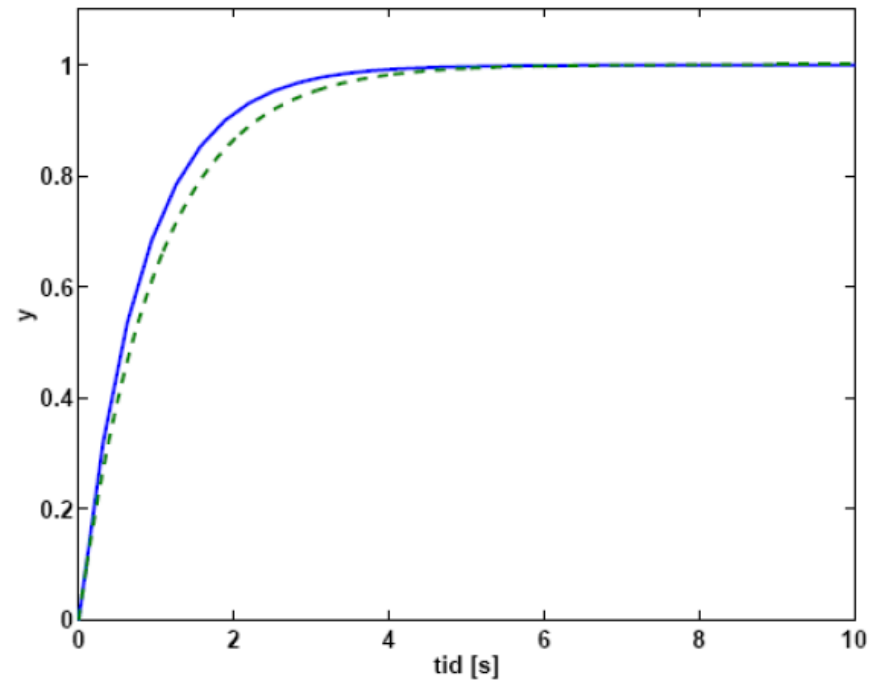
Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 0.3$ s

styrsignal u

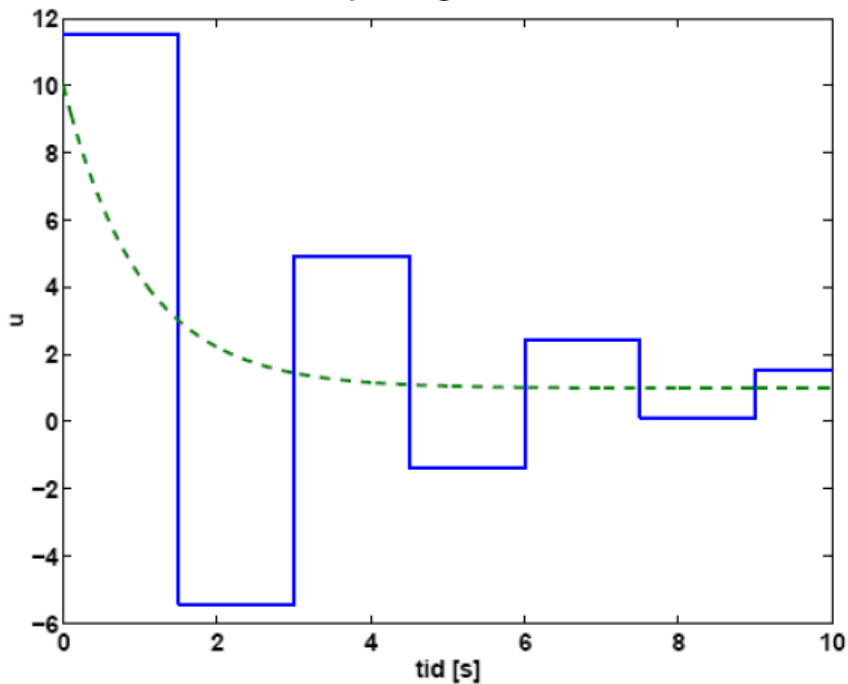


utsignal y

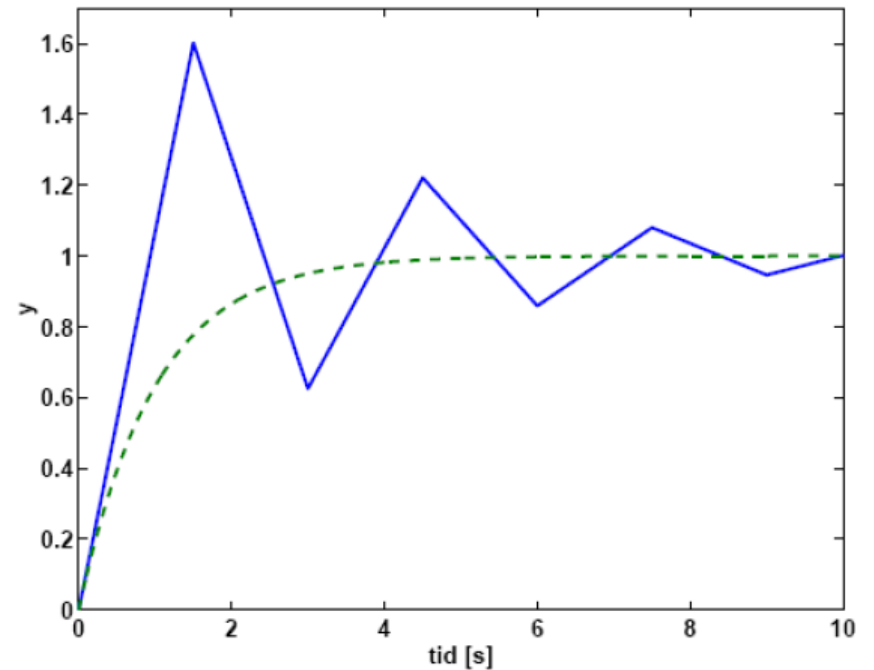


Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 1.5$ s
styrsignal u



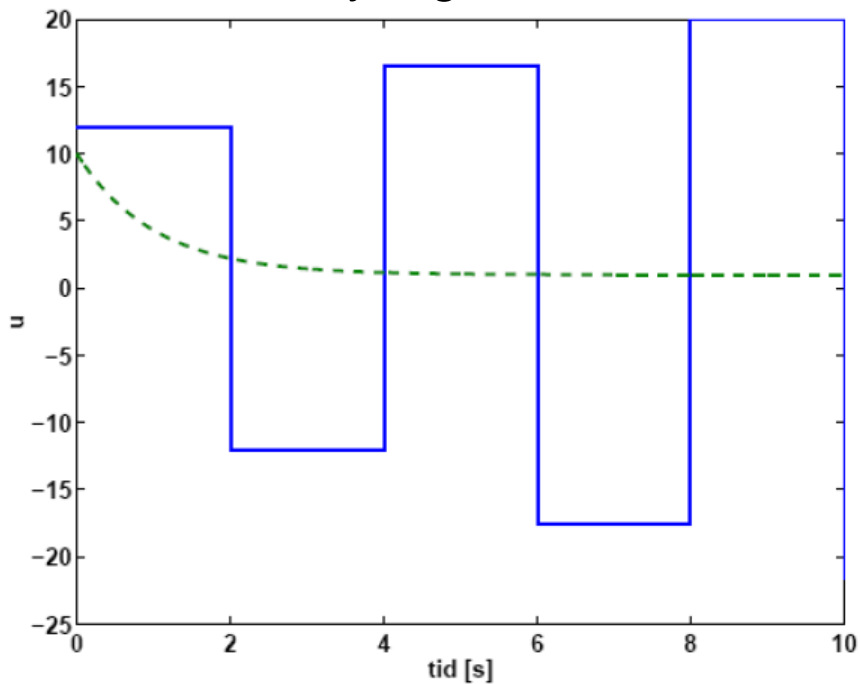
utsignal y



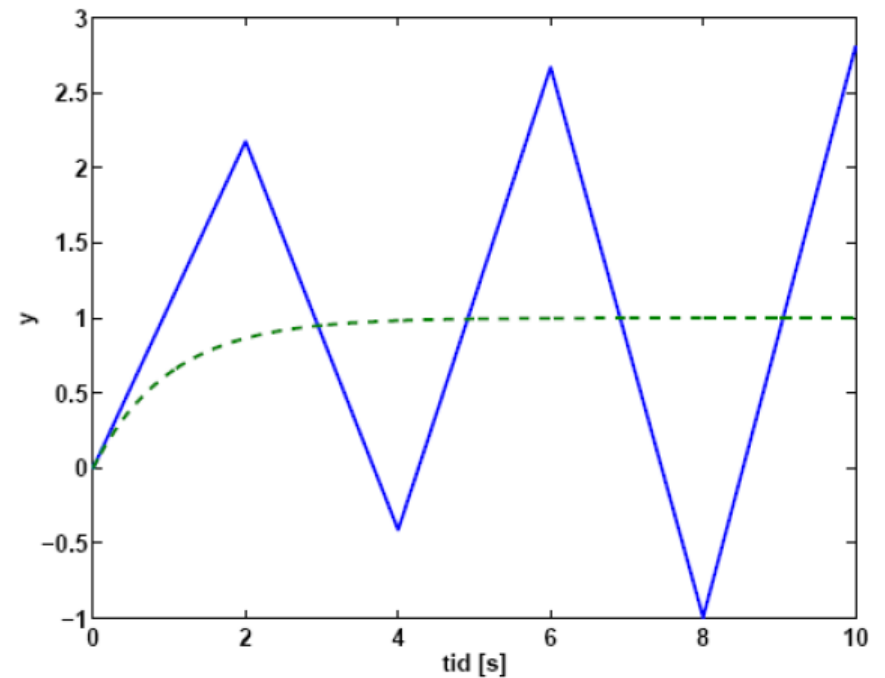
Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 2.0$ s

styrsignal u



utsignal y





Quiz

Vad är Eulerapproximationen av en PI-regulator?

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$



Quiz

Vad är Tustinapproximationen av en PI-regulator?

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$