KTH ROYAL INSTITUTE
OF TECHNOLOGY

# EL1000/1120 Reglerteknik AK

## Föreläsning 11:
## Implementering

# Kursinfo: Tentamen

- Ordinarie tentamenstillfälle är fredagen den 15/1 kl.14.00-19.00
- Obligatorisk föranmälan ska ske senast **16 december** på Mina sidor (Mina sidor-Tentamen-Mina tentor)
- Tillåtet att gå upp på omtenta för EL1000 period 1 (Fysik/Elektro) istället (fredagen den 8/1 kl.08.00-13.00)
- **OBS! Ej tillåtet att gå upp på båda dessa tentor. Välj en!**

# Kursinfo: Räknestugor

- Resterande räknestugor:
  - 151209, 17-19 Q15
  - 151211, 15-17 Q26
  - 151214, 10-12 V21
  - 160112, 10-12 V3
  - 160113, 14-16 Q2

- Bra tillfälle att räkna och få svar på frågor inför Lab2, Lab3 och tentan

# Kursinfo: Resterande kursprogram

- Föreläsning 11 (idag): Implementering
  - Efter föreläsningen kan de som vill besöka vårt fordonslabb. (Smart Mobility Lab)
- Föreläsning 12 (10 december): Sammanfattning
  - Repetition enligt önskemål
  - Skicka önskemål till hsan@kth.se senast idag
  - Lösning av tentatal

# Dagens program

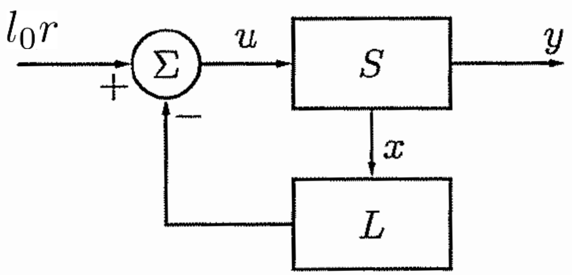
- Tillståndsåterkoppling med observatör (repetition, slides)
- Kaskadregulator (repetition, slides)
- Implementering (slides, tavlan)

# Tillståndsåterkoppling (Föreläsning 9)

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

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

$$L = \begin{pmatrix} l_1 & \dots & l_n \end{pmatrix}$$

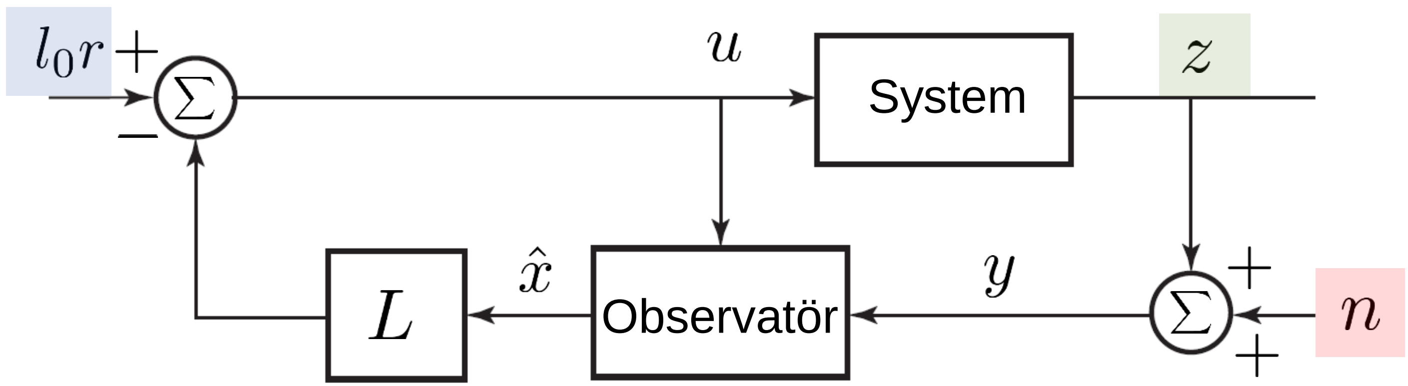



Slutna systemets poler ges av $\det(sI - A + BL) = 0$

- $n$ 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



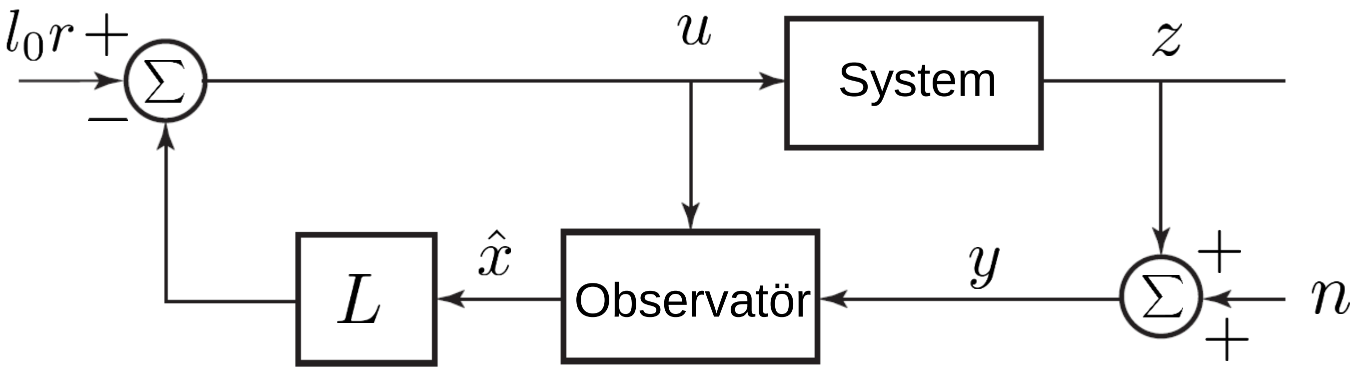

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A - BL & BL \\ 0 & A - KC \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \tilde{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} l_0 r - \begin{pmatrix} 0 \\ K \end{pmatrix} n$$

$$z = \begin{pmatrix} C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \tilde{x} \end{pmatrix}$$

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

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)

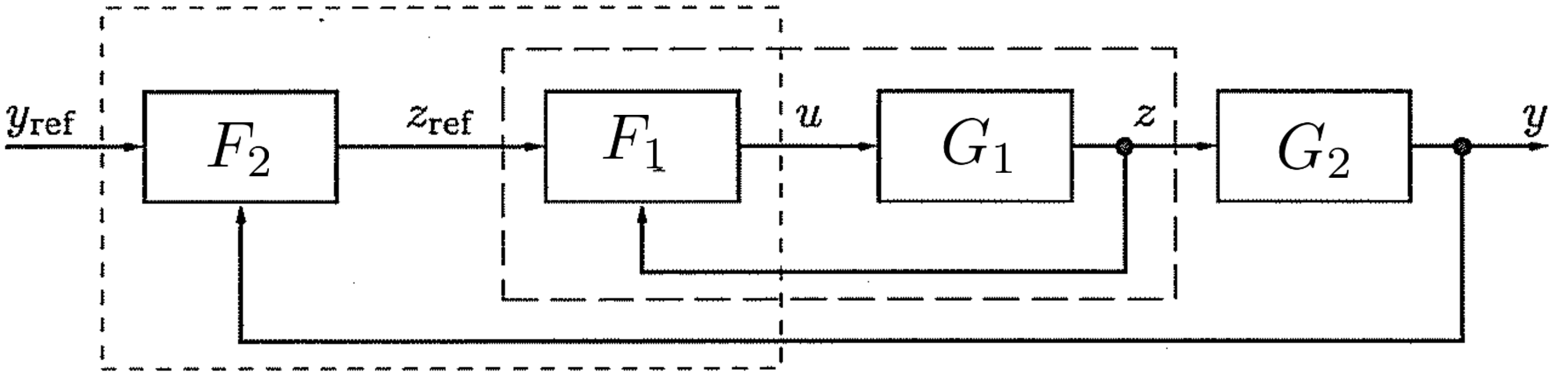
# Regulatorer hittills i kursen

- **PID**
  - Enkel och vanlig. Räcker inte alltid.
- **Kompensering**
  - ”Ingenjörsmässig”, automatiskt robust (fasmarginal), regulator av låg ordning, design lite av en konstart
- **Tillståndsåterkoppling + observatör**
  - Separationsprincipen, samma metod för flera in- och utsignaler, ingen automatisk robusthet, regulator av hög ordning

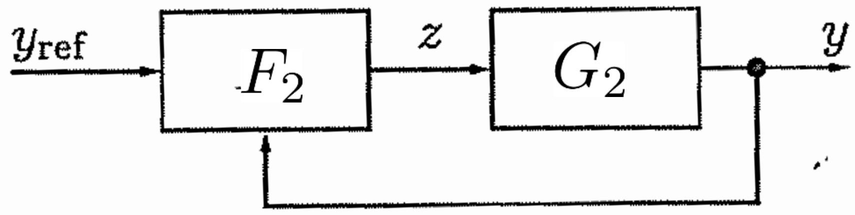
- Specialregulatorer
  - Kaskadregulator (mätbar mellansignal)
  - Framkoppling (mätbar störning, se övning)
  - Smith-prediktor (känd tidsfördröjning, se bok)

# Kaskadreglering

- Kan mäta ”mellansignal” $z$




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



# Exempel 1: Rategyroåterkoppling för flygplan (Föreläsning 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 $y_{\text{ref}}$ till $y$:

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

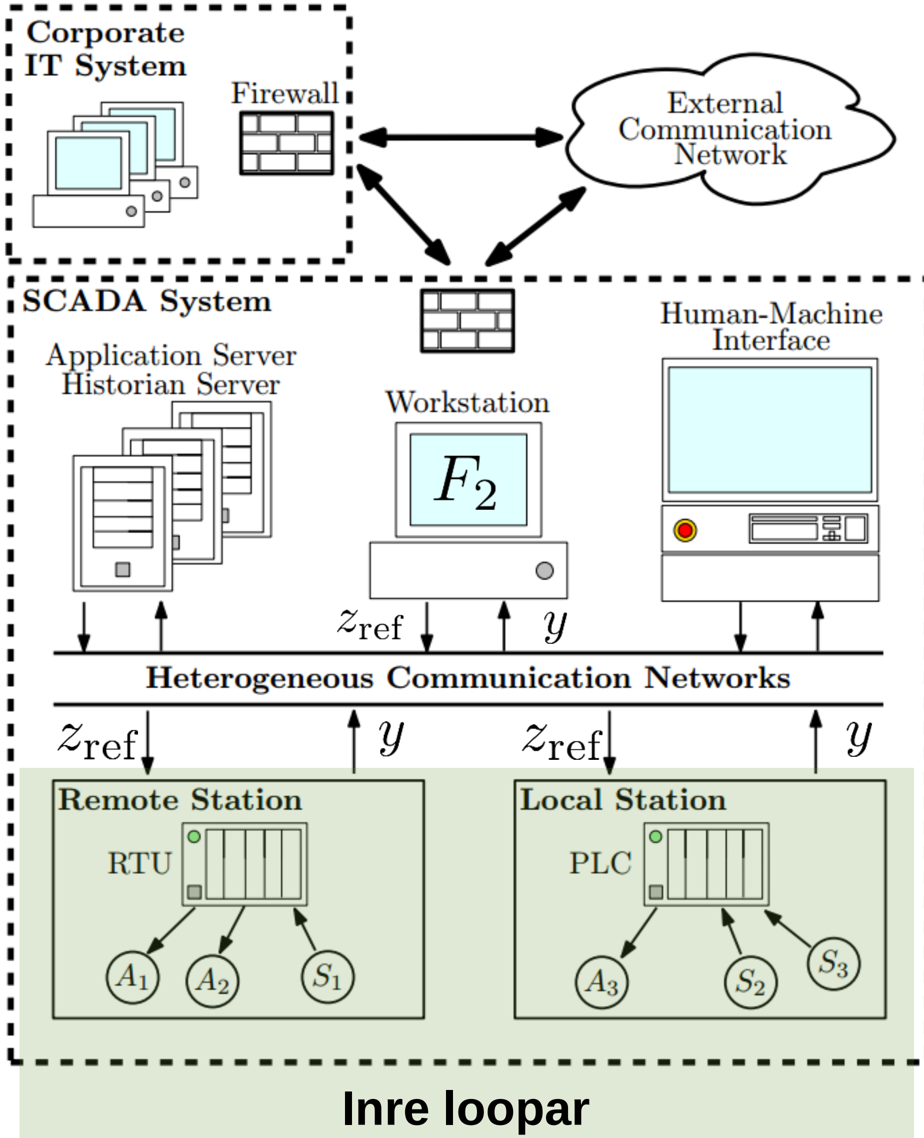
- Approximation gäller om $K_1$ är stor i förhållande till $s = i\omega$ ($y_{\text{ref}}(t)$ ska vara lågfrekvent)
- Under dessa villkor ”syns” ej inre loopen i utsignalen $y$!

- Smart utnyttjande av mellansignalen förenklar reglerdesign. Förutsätter möjlighet för tidskaleseparation av dynamiken

# Exempel 2: SCADA system

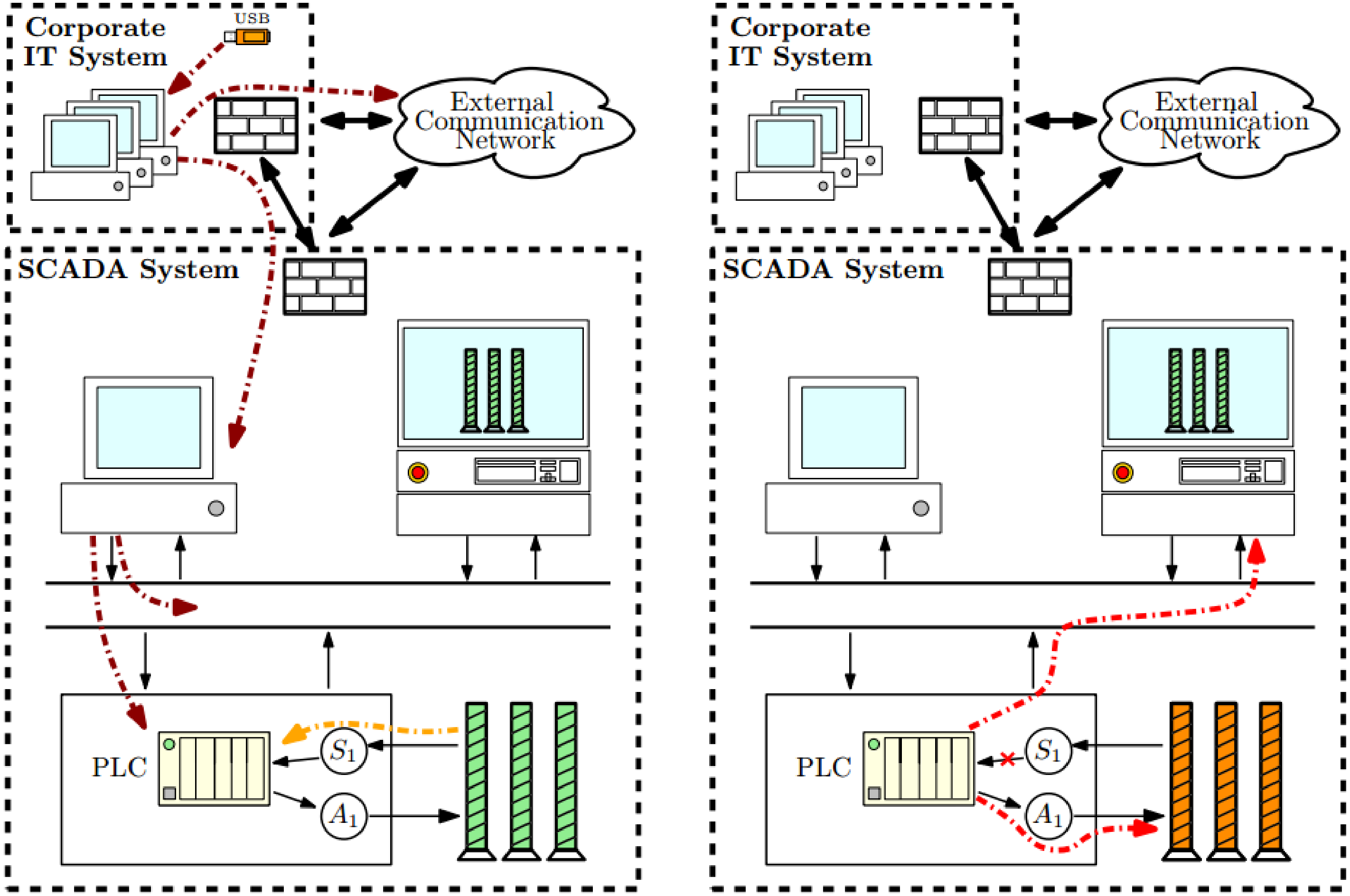
**S** Supervisory
**C** Control
**A** And
**D** Data
**A** Acquisition

Kommunikationssystem för styrning och övervakning av industriella styrsystem och kritisk infrastruktur



# Aktuell forskning: Cybersårbarheter i SCADA system

Exempel: Stuxnet-attacken 2010




A. Teixeira, “Towards cyber-secure and resilient networked control systems,” Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2014

Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

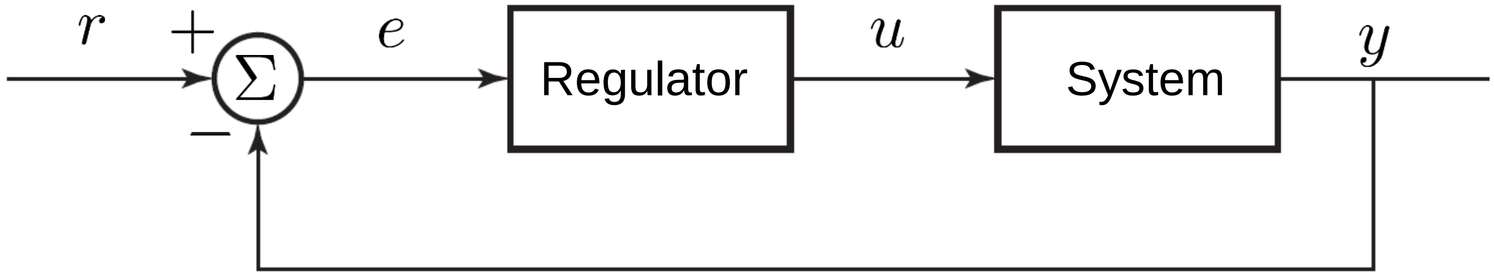
# Vägledning till ökad säkerhet i industriella informations- och styrsystem

Nytt KTH-projekt:
CERCES – Center för resilienta kritiska infrastrukturer

# Dagens program

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

# Implementering



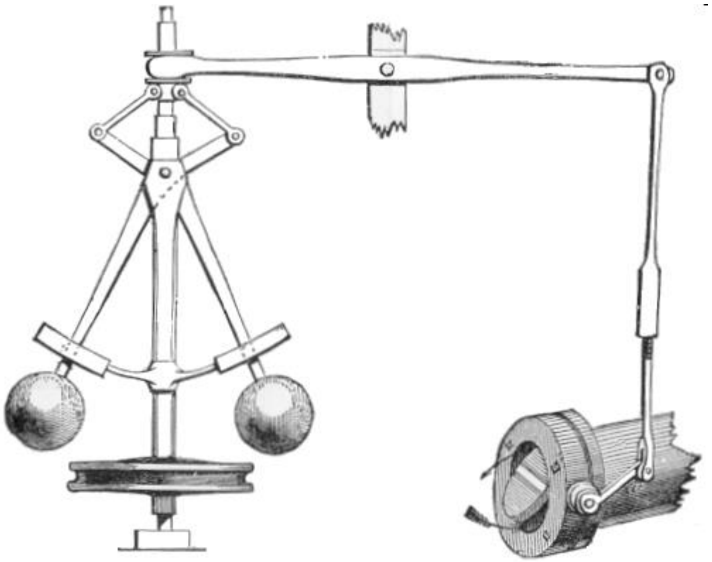

Hur förverkliga sambandet ($F(s)$) mellan $e(t)$ och $u(t)$?

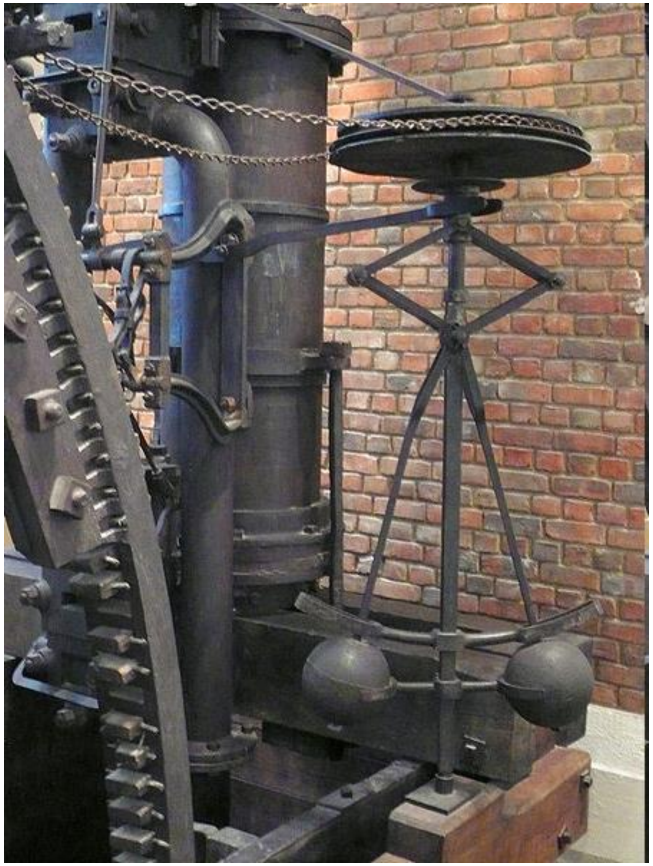
- **Analogt:** mekanik, elektronik, pneumatik. Signaler representeras av spänningar, tryck, etc.

- **Digitalt:** programmering. Signaler representeras av tal i en dator.

# Centrifugalregulatorn

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





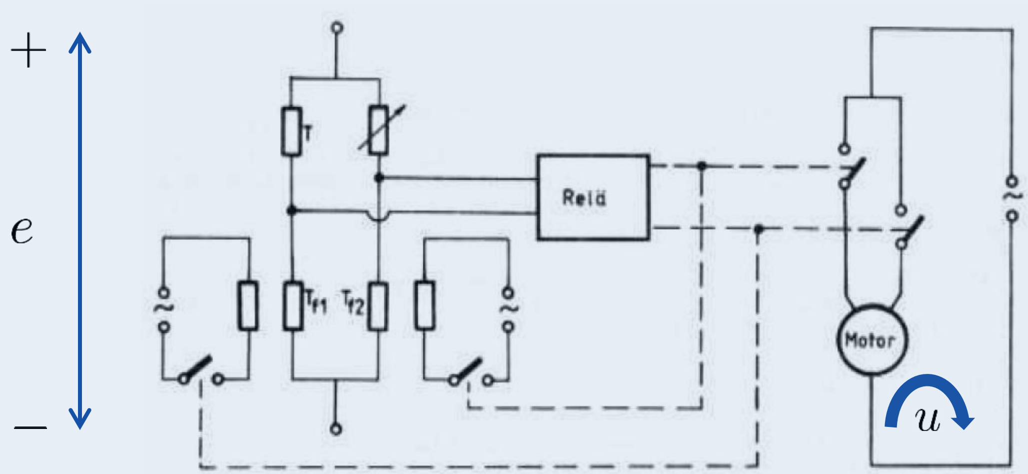
# Centrifugalregulatorn

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 ≈ PI-regulator




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

# Varför digital implementering?

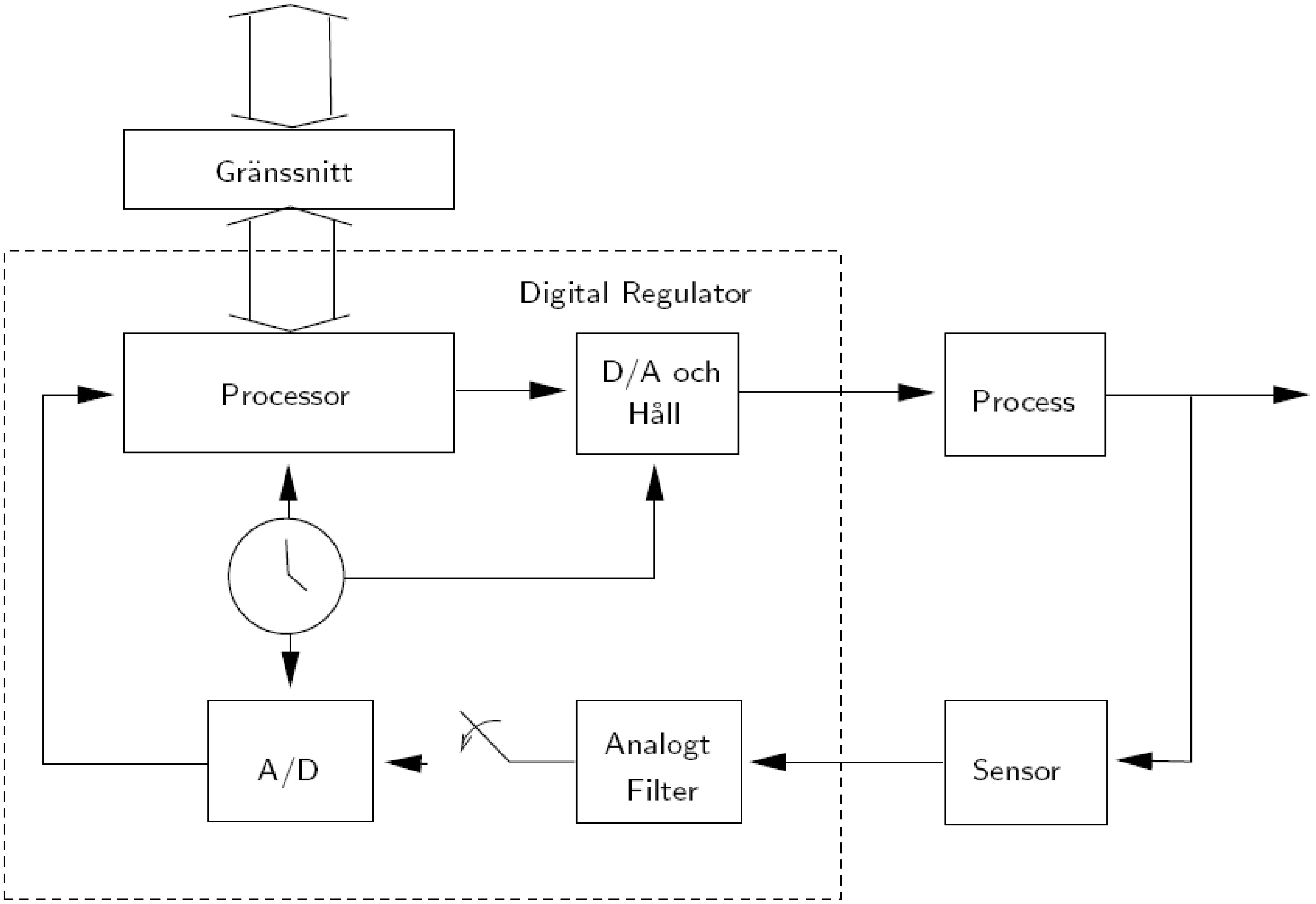
Fördelar:

- Billigt
- Flexibelt
- Kan realisera komplicerade samband

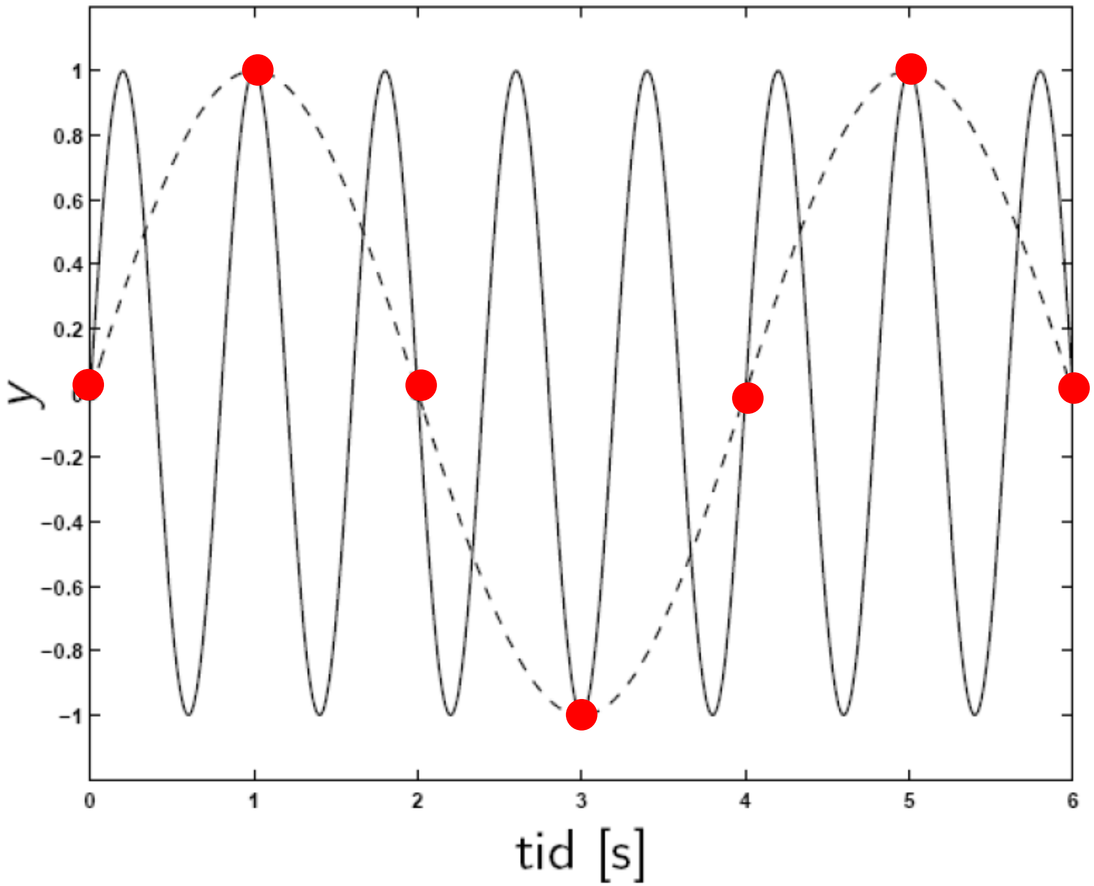
Nackdelar:

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

# Hur ser den digitala implementeringen ut?



# Aliaseffekten

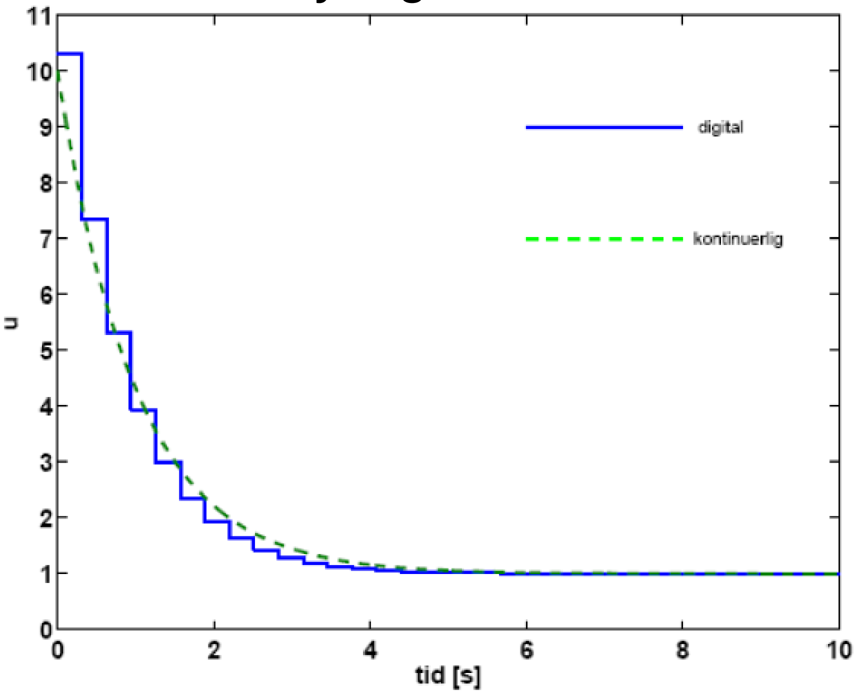



Signal med frekvens $\omega = 2.5\pi$ rad/s uppfattas som signal med frekvens $\omega = 0.5\pi$ rad/s! (Samplingsperiod $T = 1$ s, Nyquistfrekvens $\omega_N = \frac{\pi}{T} = \pi$ rad/s)

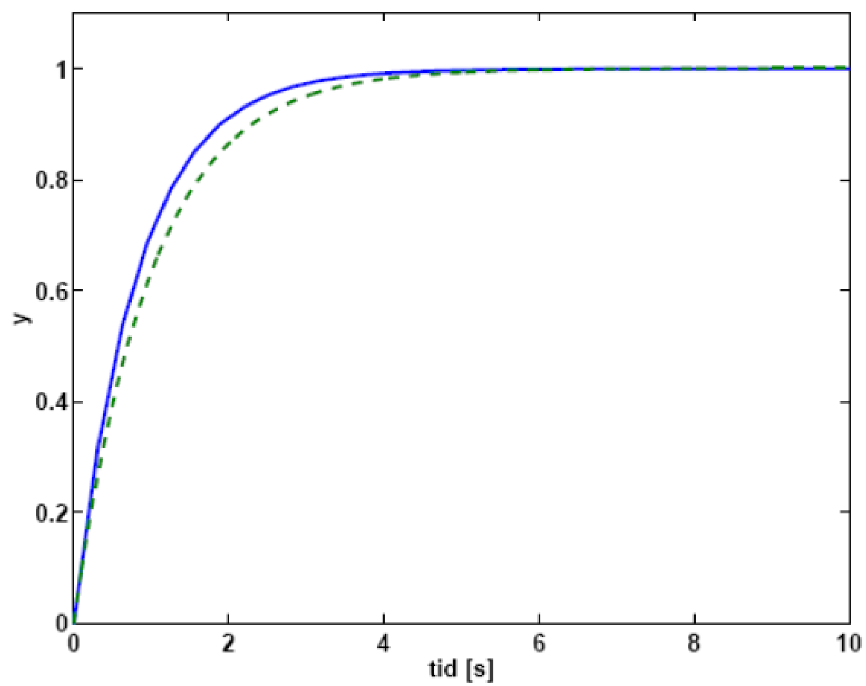
# Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 0.3$ s

styrsignal $u$




utsignal $y$

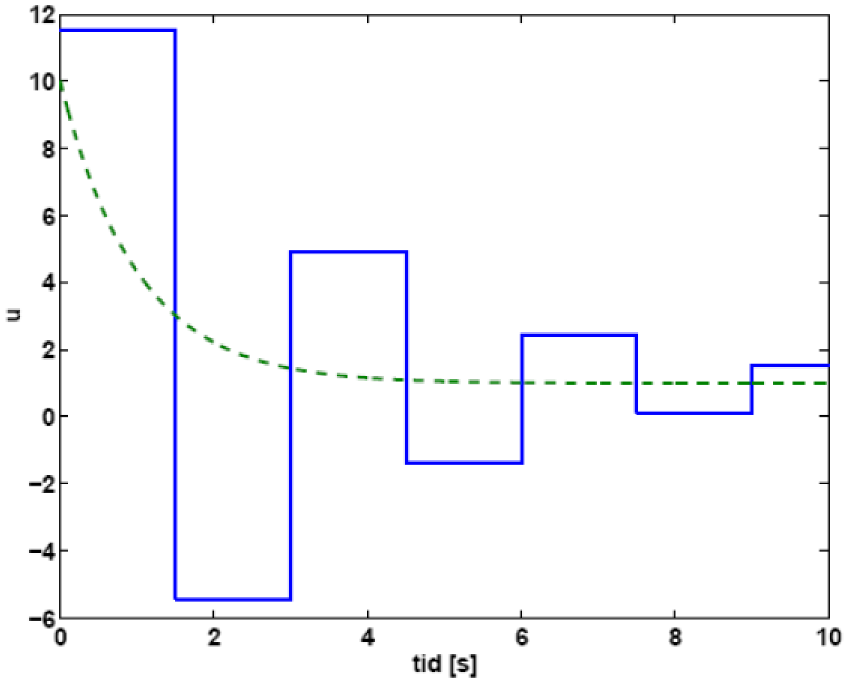


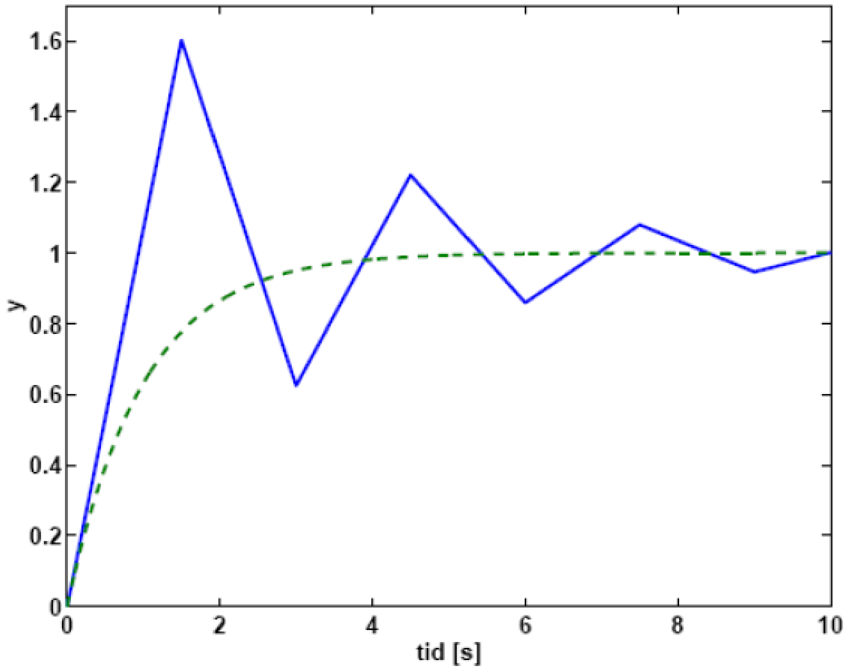
# Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 1.5$ s

styrsignal $u$

utsignal $y$

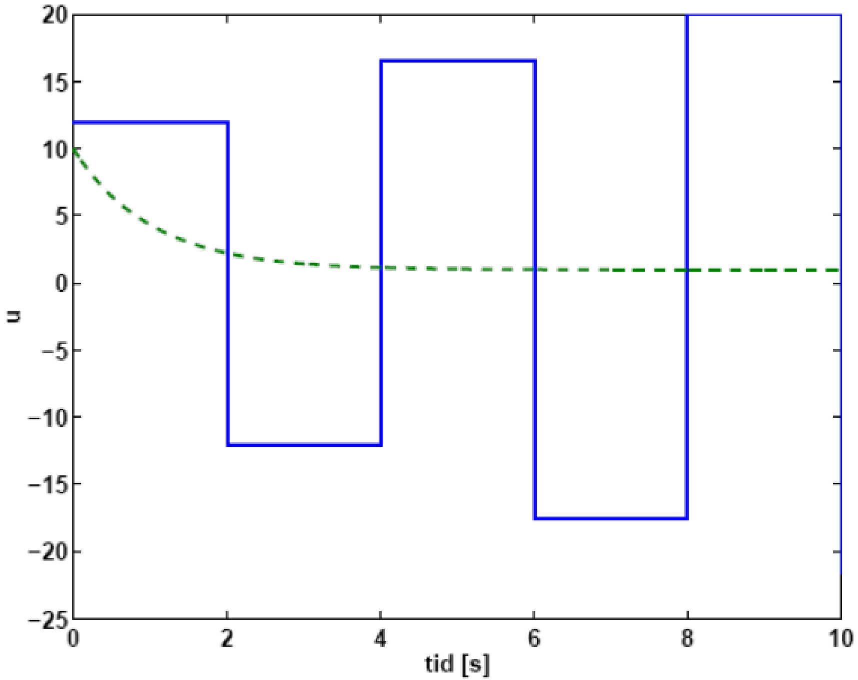


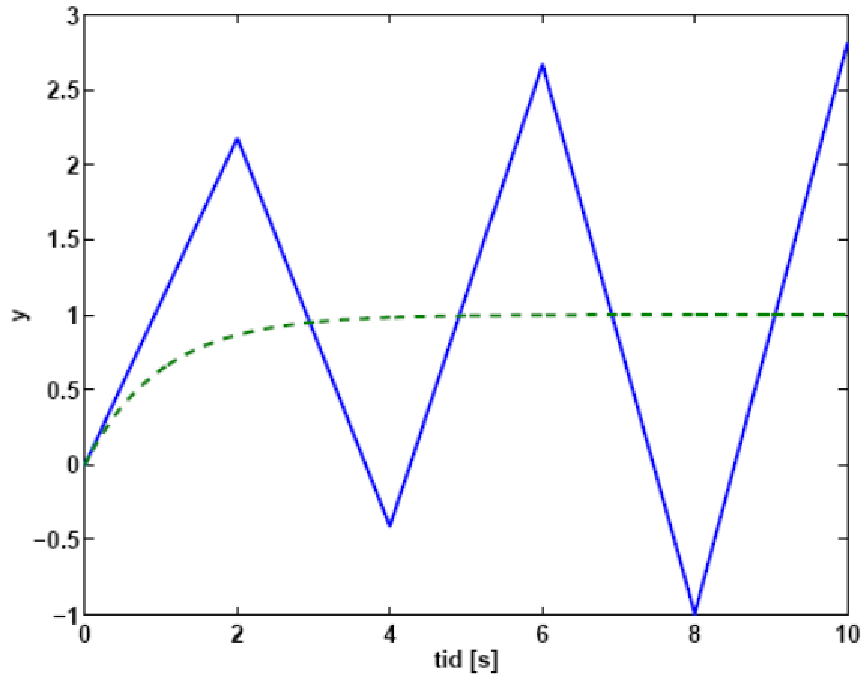
# Exempel: Digital implementering

Sampeltid $T = 2.0$ s

styrsignal $u$




utsignal $y$



# Quiz

(1) Vad är Eulerapproximationen av en PI-regulator?

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

# Quiz

(2) Vad är Tustinapproximationen av en PI-regulator?

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