

TSFS05 – Fordonssystem – Fö 3
Motorreglering

Lars Eriksson - Kursansvarig
Per Öberg - Vikarierande föreläsare

Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik
Linköpings universitet
laxe@isy.liu.se

August 23, 2011

Repetition

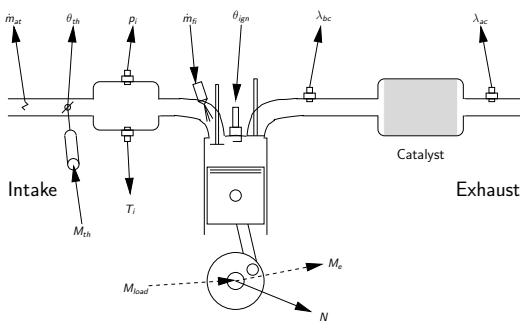
Modellering

Grundläggande Reglering

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

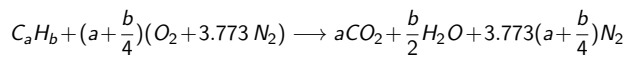
Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Förbränning och stökiometri

Perfekt förbränning av ett kolväte



Stökiometriskt luft/bränsle-förhållande

$$(A/F) = \frac{m_a}{m_f} \text{ och } (A/F)_s = \frac{(a + \frac{b}{4})(2 \cdot 16.00 + 3.773 \cdot 2 \cdot 14.007)}{12.01 a + 1.008 b}$$

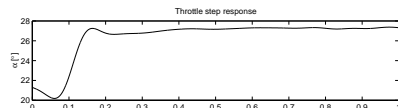
$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_s} \text{ och } \phi = \frac{1}{\lambda}$$

Frigord värme och en enkel modell: $Q = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$

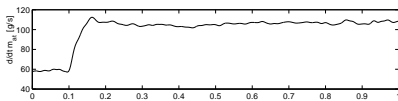
Motor – Repetition – Medelvärdesmodeller

Målet är modeller som beskriver denna typ av signaler.
Jämför tidskonstanten med 3000 rpm = 50 rps ⇒ 0.02 s/varv

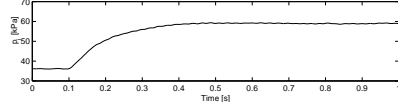
Steg i trottelt (aktuator)



Luftflöde (sensor)



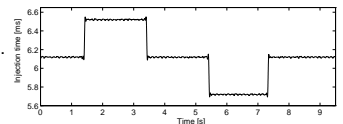
Tryck (sensor)



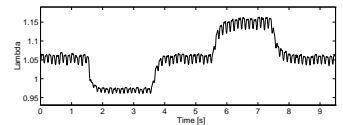
Motor – Repetition – Medelvärdesmodeller

Även ett bränsledynamiksexempel:

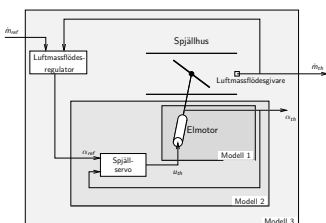
Steg i insprutad bränslemängd.



Svaret i lambda (+ elektrisk störning.)



Trottelflödesmodeller (förslag till projekt 1c)



Fyra modeller (tre numererade):

- Modell 1: Trotteltörelse $u_{th} \rightarrow \alpha$
- Modell 2: Trottelservo $\alpha_{ref} \rightarrow \alpha$
- Modell 3: Luftmassflödesregulator: $\dot{m}_{at,ref} \rightarrow \dot{m}_{at}$

Luftflödesmodell

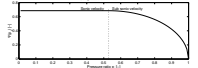
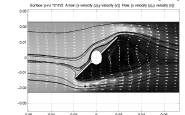
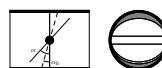
Kompressibel isentropisk strömning genom en strypning.

$$\dot{m}_{at} = \frac{p_a}{\sqrt{RT_a}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(p_r)$$

Area $A_{th}(\alpha)$

Kontraktion $C_{th}(\alpha)$

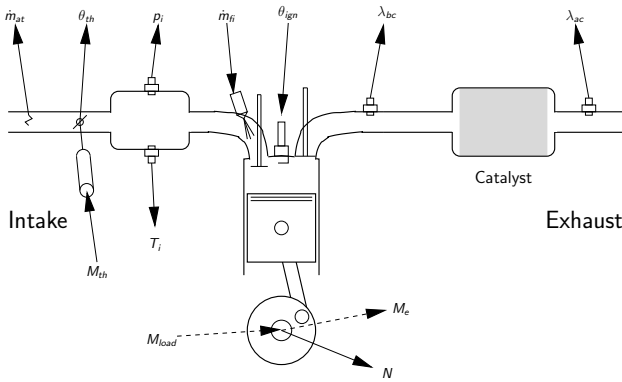
Ljudhastigheten



$$\Psi(p_r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\gamma} \left(\frac{p_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_r^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\gamma \left(\frac{p_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \frac{1}{\gamma} \right) - \left(\frac{p_r}{\gamma} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} & p_r > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ 1 & p_r \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \end{cases}$$

Modellsammanfattning – Luft och bränsle

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Modellsammanfattning 2(2)

Bränsleinjektor

$$\dot{m}_{fi} = C_1 N (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

Bränslefilm

$$\frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp}$$

$$\dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp}$$

λ till motor

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ac}}{\dot{m}_{fc}} / (A/F)_s$$

Transportfördröjning

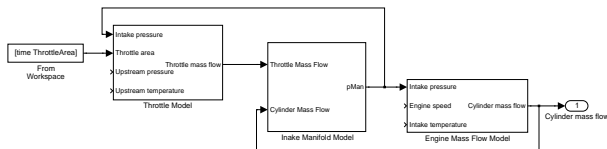
$$\lambda_{exh}(t) = \lambda(t - \tau_d(N))$$

Sensordynamik

$$\frac{d}{dt} \lambda_s(t) = \frac{1}{\tau_\lambda} (\lambda_{exh}(t) - \lambda_s(t))$$

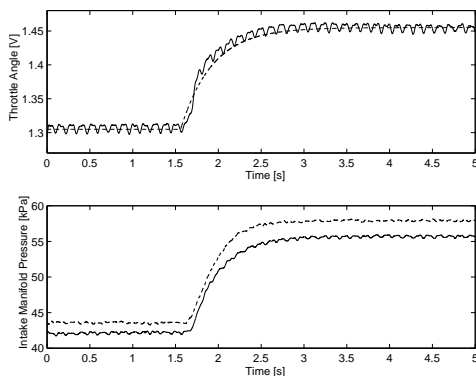
Insugsrör – Modellvalidering

- ▶ Validering – Jämföra modell och verklighet (mätning)



- ▶ Koppla in uppmätta signaler till modellen
- ▶ Simulera \Rightarrow Utsignal
- ▶ Jämför simuleringsresultatet med mätningen

Insugsrör – Modellvalidering



Modellsammanfattning 1(2)

Gaspedalstolkning

$$\dot{m}_{at,ref} = (\dot{m}_{at,max}(N) - \dot{m}_{at,min}) \cdot u_{pedal} + \dot{m}_{at,min} \quad \text{där } u_{pedal} \in [0, 1]$$

Luftflöde in i insugsröret

$$\dot{m}_{at} = H(s) \dot{m}_{at,ref}$$

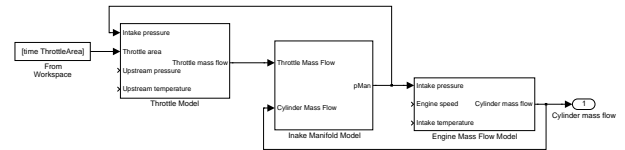
Luftflöde in i cylindern

$$\dot{m}_{ac}(N, p_i, T_i) = \eta_{vol}(N, p_i) \frac{p_i V_d n_{cyl} N}{R T_i n_i}$$

Tryckkuppbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} \frac{dm_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

Implementering av tryckkuppbyggnad



ODE för tryckdynamiken i insugsröret

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R T}{V} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

$$\rho(t) = \rho_0 + \int_0^t \frac{dp}{dt} dt$$

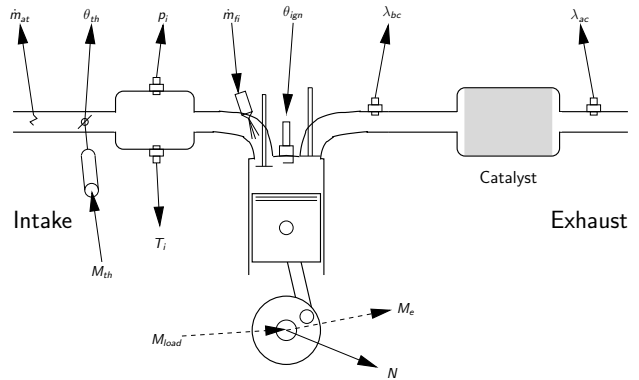
$$\rho(t) = \rho_0 + \int \frac{R T}{V} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac}) dt$$

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{1}{s} \frac{R T}{V} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

Ange starttillståndet $\rho_0 = \rho(t_0)$ i $\frac{1}{s}$

Insugsrör – Modellvalidering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Innehållsförteckning

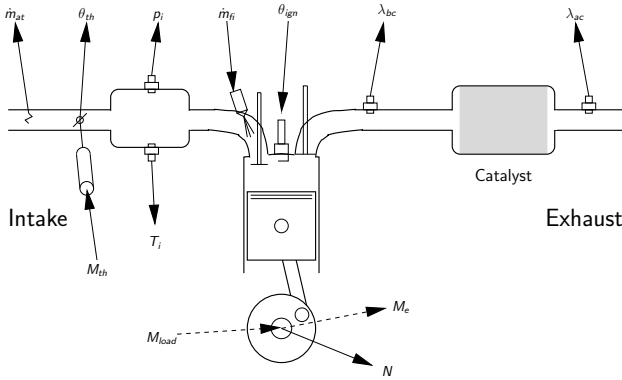
Repetition

Modellering

Grundläggande Reglering

Lambda sensorer – Diskret

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



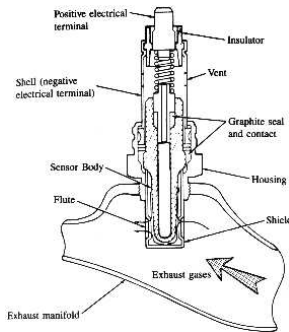
Sensormodell för diskret sensor

Sensors utsignal

$$\lambda_{\text{sond}} = \begin{cases} 1 \text{ V} & \text{om } \lambda_s < 1 \\ 0.6 \text{ V} & \text{om } \lambda_s = 1 \\ 0 \text{ V} & \text{om } \lambda_s > 1 \end{cases}$$

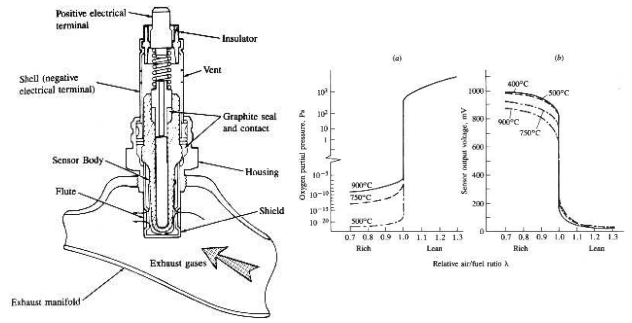
Signalkonditionering i styrsystemet omvandlar enkelt signalen till

$$\lambda_{\text{sond}} = \begin{cases} 1 & \text{om } \lambda_s > 1 \\ 0 & \text{om } \lambda_s = 1 \\ -1 & \text{om } \lambda_s < 1 \end{cases}$$



Diskret λ-sensor

- Diskret i amplitud: Mager – Fet
- Billigaste möjliga sensorn för ändamålet



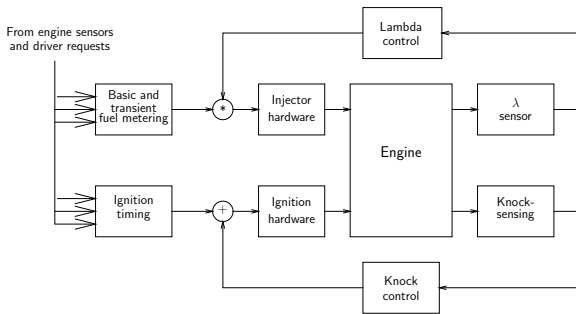
Innehållsförteckning

Repetition

Modellering

Grundläggande Reglering

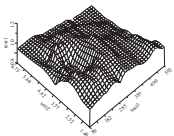
Motorreglering - De två huvudlooparna



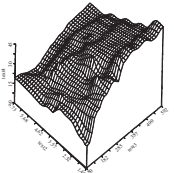
De olika regulatorerna kan vara

- ad hoc lösningar
- baserade på mappar
- designade med modellbaserade metoder

Engine control - Map based control



Mapbaserad reglering kan utvidgas och optimeras till mycket stor förfiningsgrad.



Ett exempel med optimal luft/bränsle λ and tändningsvinkel α för ett FTP test.

Bensinmotorreglering

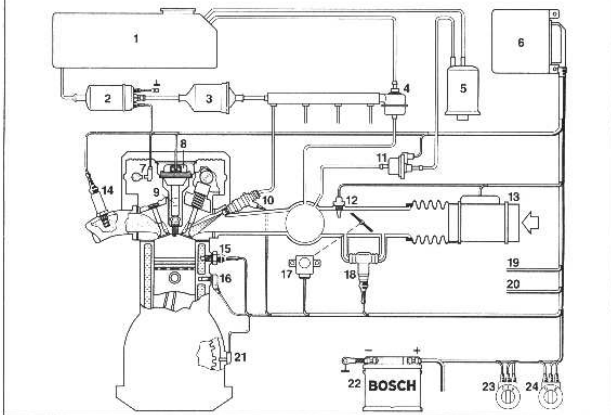
Två huvudloopar för alla bensinmotorer:

- Luft- och bränsleriglering (Emissioner)
- Tändningsreglering (Effektivitet eller bränsleförbrukning)

Motorreglering - Mappbaserad reglering

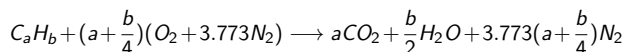
- I grundläggande mappbaserad reglering är varvtalet och trycket insignaler och utsignalen från mappen är styrsignalen, t.ex. $t_{inj} = f(N, p_i)$.
- Mappbaserad reglering är väletablerad teknik i industrin och man kan utvidga mapparna till fler sensorer och ha kompensations mappar för t.ex. transienter, varvtals förändringar, kallstarter, etc.
- Nackdelen med dessa är att det tar tid att kalibrera alla mappar bestämma alla värden i alla mappar i ett modernt system. Detta motiverar den nya trenden att använda modeller med få(/färre) parametrar som beskriver funktionen istället.

Schematic of a Motronic system (Motronic M3)
 1 Fuel tank, 2 Electric fuel pump, 3 Fuel filter, 4 Pressure regulator, 5 Carbon canister, 6 ECU, 7 Phase sensor, 8 Distributorless ignition, 9 Spark plug, 10 Injector, 11 Canister-purge valve, 12 Air-temperature sensor, 13 Hot-wire mass airflow meter, 14 Lambda sensor, 15 Coolant-temperature sensor, 16 Knock sensor, 17 Throttle actuator, 18 Idle-speed actuator, 19 CAN, 20 Diagnosis, 21 Engine speed and reference sensor, 22 Battery, 23 Ignition switch, 24 A/C switch.



Reglermål – Emissioner från motorn

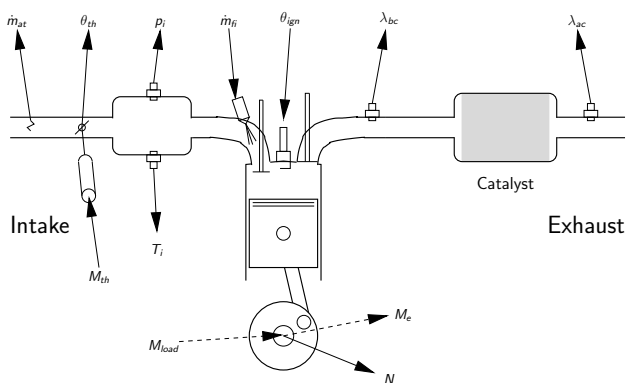
Perfekt förbränning



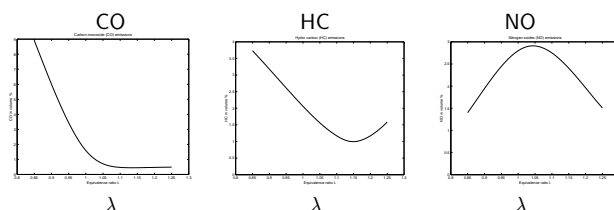
Vatten, koldioxid och kväve räknas inte som emissioner.
 (Minskning av koldioxidutsläpp kräver minskad bränsleförbrukning, eller att man samlar alla avgaser?)
 Bildas även NO , NO_2 , CO , och oförbrända kolväten HC

Emissioner efter motorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



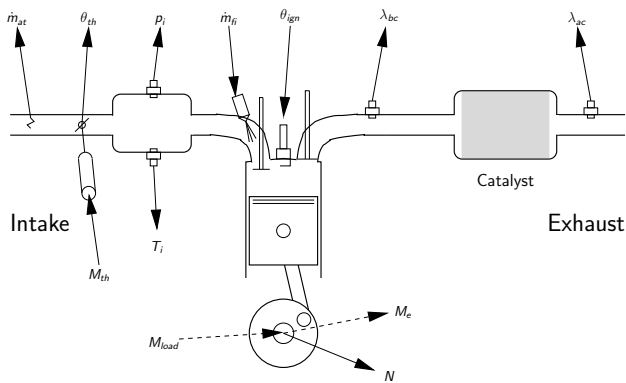
Emissionerna påverkas av luft/bränsle förhållandet



Kan förstå det mesta från reaktionsekvationen

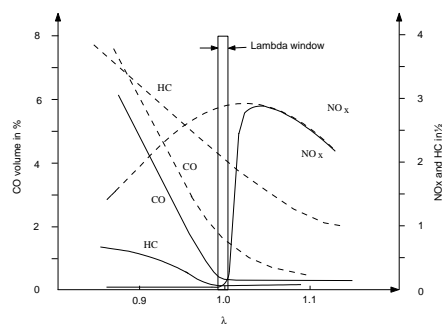
Emissioner efter katalysatorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trevägskatalysatorn och lambda-fönstret

streckad - före katalysatorn heldragen - efter katalysatorn



Luft- och bränsleriglering

Trevägskatalysatorn:

- ▶ oxiderar - HC
- ▶ oxiderar - CO
- ▶ reducerar - NO, NO₂

med hög effektivitet om $\lambda \in 1 \pm 0.03$

Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering

Grunläggande mål:

Ge en förbränningsbar blandning av luft och bränsle.

Delmål:

Reglera $\lambda = 1$ - emissionsrening (**viktigast**)

Reglera $\lambda > 1$ - bränsleeffektivitet

Reglera $\lambda < 1$ - skydda motor och andra komponenter

Strategier:

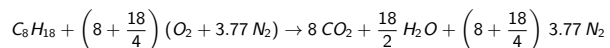
Föraren → spjällvinkel

Föraren → bränslemängd

Föraren → "luftmängd" reglersystemet styr α och \dot{m}_f .

Trevägs-katalysatorn – λ-sonden

Stökiometrisk reaktion (perfekt blandning och förbränning) mellan isooktan och luft.



I verkligheten bildas det alltid HC , CO , NO_x , O_2 , ...

Trevägs-katalysatorn reducerar NO_x samt oxiderar HC och CO om $\lambda = 1$.

För bra funktion krävs att $\lambda = 1 \pm 0.03$

λ-sonden mäter syrekonzentrationen.

Omslagspunkten ger information om $\lambda = 1$.

λ-reglering ($\lambda = 1 \pm 0.03$)

Hårt krav och modellosäkerheter \Rightarrow **Återkoppling** nödvändig.

Stationärt $\lambda = 1$:

Återkoppling från (diskret) λ-sensor.

Tidsfördröjning $\tau_d(N)$

\Rightarrow **Framkoppling** nödvändig.

(Enbart återkoppling räcker ej under transienter.)

Transient:

Framkoppling från t.ex. pedalrörelse eller varvtalsförändring.

Speed density – Mass air flow.

Återkopplad λ-reglering

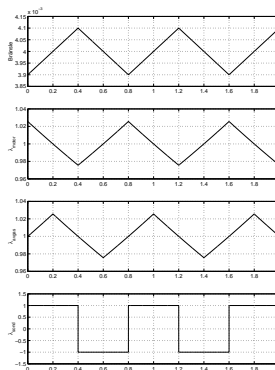
Krav: $\lambda = 1$ stationärt (inget stationärt fel).

Vilken är den enklaste regulatorn som uppfyller detta?

Analys av reglersystemet

- Beskrivande funktion (reglerteori/reglerteknik fk).
- Förenklad grafisk lösning men fortfarande exakt lösning.

Integrerande regulator



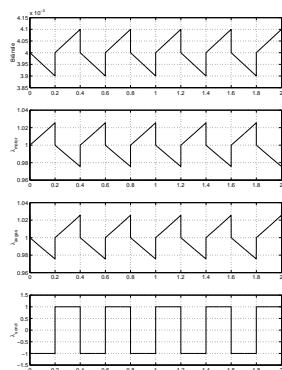
Bränsle: $u(t) = K_I \int \lambda_{sond}(t) dt$

$$\lambda_{motor}(t) = \frac{K_{luft}(t)}{u(t)}$$

$$\lambda_{avg}(t) = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$$

$$\lambda_{sond}(t)$$

PI regulator



$$u(t) = K_p \lambda_{sond}(t) + K_I \int \lambda_{sond}(t) dt$$

$$K_p = \frac{1}{2} \tau_d K_I$$

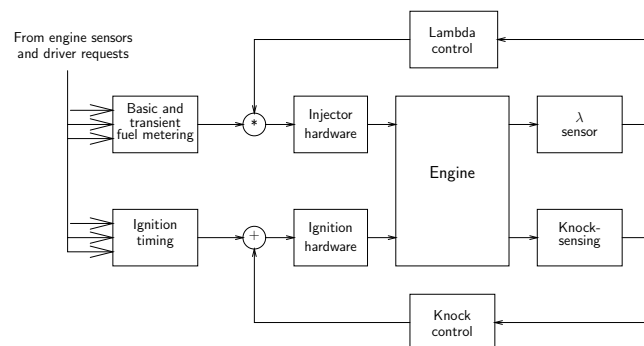
$$\lambda_{motor}(t) = \frac{K_{luft}(t)}{u(t)}$$

$$\lambda_{avg}(t) = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$$

$$\lambda_{sond}(t)$$

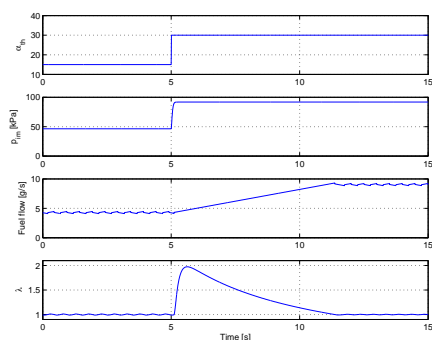
Framkoppling i λ-regulatorn – Transienter

Viktigaste reglerlooparna för bensin motorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



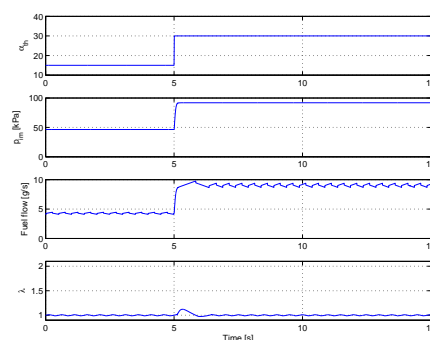
Varför räcker det inte med återkoppling?

Diskret sensor, tidsfördröjning, och hårda begränsningar på λ stationärt begränsar förstärkningen.

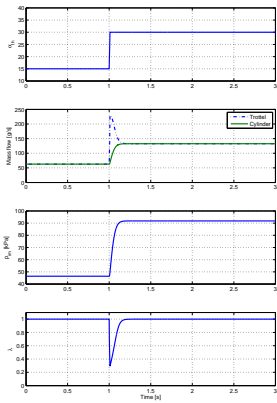


Med framkoppling i λ-regulatorn

Reglering med framkoppling (ingen kompensering för bränslefilmen)



λ-Reglering – Transient



Kan inte mäta \dot{m}_{ac}

Mass air flow principle:

Kan mäta \dot{m}_{at}

Problem pga ej rätt flöde (se fig)

Speed density principle:

Utnyttja η_{vol} och mät p_i , N samt T_i .

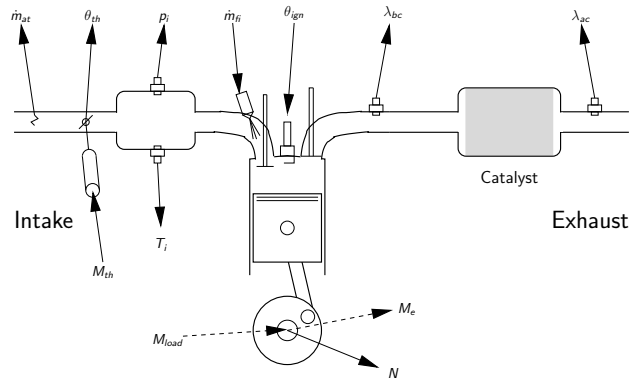
$$\dot{m}_{ac}(N, p_i, T_i) = \eta_{vol}(N, p_i) \frac{p_i V_d N}{R T_i n_i}$$

Viktiga praktiska aspekter:

Svarstid i trycksensor, filtrering, prediktering.

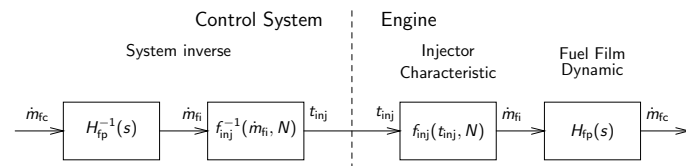
Kompensering för bränslefilm och injektor

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Framkoppling – Bränslefilm och injektor

Grundprincip – Systeminvertering (statisk, dynamisk)



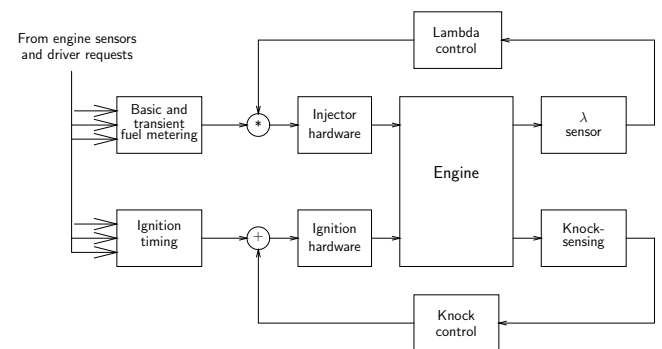
Om bränslefilmen är ett LTI-system, så kan $H_{fp}(s)$ användas

$$\begin{cases} \frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \\ \dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \end{cases} \Leftrightarrow \dot{m}_{fc} = \underbrace{\left[(1 - X) + \frac{X}{s \tau_{fp} + 1} \right]}_{H_{fp}(s)} \dot{m}_{fi}$$

om X och τ_{fp} beror på arbetspunkten \Rightarrow använd observatör

Luft/bränsle regleringsloop – Återkoppling + framkoppling

Viktigaste reglerlooparna för bensin motorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



Modellbaserad reglering

Använd modellen och skapa en observatör som:

- rekonstruerar tillstånden
- predikterar systemets beteende

System:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}$$

Observatör:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) \end{cases}$$

Modellbaserad reglering – Ett exempel

Modellen:

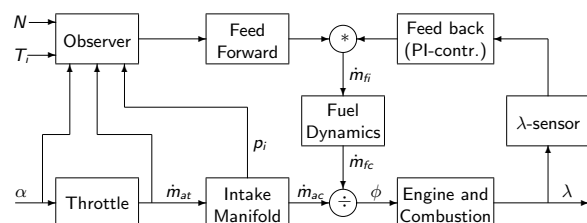
$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} (\dot{m}_{at}(\alpha, p_a, p_i, T_a) - \dot{m}_{ac}(N, p_i, T_i)) & \text{Tillstånd} \\ \frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} & \\ \dot{m}_{at} = \frac{p_a}{\sqrt{R T_a}} Q_{th}(\alpha) \Psi\left(\frac{p_i}{p_a}\right) & \text{Mätbara utsignaler} \\ p_i = p_i & \\ \dot{m}_{ac} = \eta_{vol}(N, p_i) \frac{V_d N p_i}{60 n_i R T_i} & \text{Icke mätbara utsignaler} \\ \dot{m}_{fp,c} = \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} & \end{cases}$$

Observatören:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{p}_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} (\hat{m}_{at} - \hat{m}_{ac}) + K_{11}(\hat{m}_{at} - \hat{m}_{at}) + K_{12}(p_i - \hat{p}_i) \\ \frac{d\hat{m}_{fp}}{dt} = X \hat{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} + K_{21}(\hat{m}_{at} - \hat{m}_{at}) + K_{22}(p_i - \hat{p}_i) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \hat{m}_{at} = \frac{p_a}{\sqrt{R T_a}} Q_{th}(\alpha) \Psi\left(\frac{\hat{p}_i}{p_a}\right) \\ \hat{p}_i = \hat{p}_i \\ \hat{m}_{ac} = \eta_{vol}(N, \hat{p}_i) \frac{V_d N \hat{p}_i}{60 n_i R T_i} \\ \hat{m}_{fp,c} = \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} \end{cases}$$

Modellbaserad reglering – Ett exempel



Notera att regulatorn har en kombination av fram- och återkoppling.

Återkopplingen multiplikativ, ger information om $(A/F)_s$.

Repetition

Modellering

Grundläggande Reglering