

TSFS09 – Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor (MoDr)

Fö 4 – Momentmodellen, Motorreglering

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 8, 2020

1 / 50

Innehållsförteckning

Repetition
Modellvalidering
Termodynamik
Knack – En begränsning

Momentmodellen

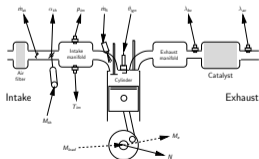
Grundläggande Reglering

2 / 50

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



3 / 50

Modellsammanfattning 1(3)

Gaspedalstökning och trottelposition

$$\alpha_{ref} = u_{pedal} \quad \text{där } u_{pedal} \in [0, 1]$$

$$\alpha = H_\alpha(s) \alpha_{ref}$$

Luftflöde in i insugsröret

$$\dot{m}_{at}(\alpha, p_{amb}, T_{amb}, \Pi) = \frac{p_{amb}}{\sqrt{RT_{amb}}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(\Pi)$$

Luftflöde in i cylindern

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

Tryckkuppbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} \frac{dm_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

4 / 50

Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

$$\dot{m}_{cat} = C_3 \sqrt{\frac{p_{em} \Delta p}{R T_{em}}}, \quad \Delta p = p_{em} - p_{amb}$$

Gasflöde från motorn

$$\dot{m}_{cyl} = \dot{m}_{ac} + \dot{m}_{fc}$$

Tryckkuppbyggnad i avgasröret

$$\frac{dp_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} \frac{dm_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} (\dot{m}_{cyl} - \dot{m}_{cat})$$

Avgastemperatur T_{em}

Tankesätt

- Titta på ekvationerna och fundera på alla variabler ni ser, vad är de för typ?
- Hur skall man få värden på alla variabler. Signaler/parametrar/konstanter?

5/50

Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

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

Bränslefilm

$$\frac{dm_{fo}}{dt} = X \dot{m}_B - \frac{1}{\tau_{fo}} m_{fo}$$

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

Bränsleinjektor - Direkt inspr.

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

λ till motor

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

Gasblandning & Transportfördröjning

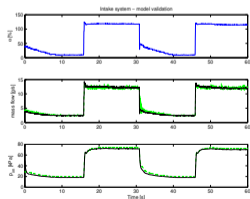
$$\frac{d}{dt} \lambda_{ash}(t) = \frac{1}{\tau_{mix}} (\lambda(t - \tau_d(N)) - \lambda_{ash}(t))$$

Sensordynamik

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

6/50

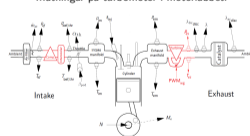
Insugsrör – Modellvalidering



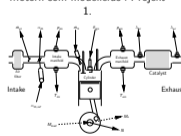
7/50

Modellering och beräkningar av modellparametrar

Mätningar på turbomotor i motorlabbet.



Motorn som modelleras i Projekt 1.



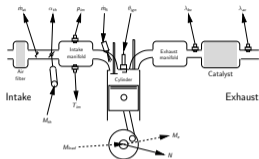
Virtuell Motor - Tänk komponentmodellering

- Vilka mätningar behövs för att modellera komponenten?
- Hur är komponenten inkopplad vid mätningen? (katalysator $p_{in} = p_{es}$)
- Hur kopplas komponenten in i motorn? (katalysator $p_{in} = p_{em}$)

8/50

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Nästa steg – Hoppa in i cylindern och räkna oss runt cykeln – Termodynamik
Siktet inställt på en fysikaliskt baserad momentmodell.



9/50

Repetition Termodynamik

Isentropisk betyder

- ▶ Ingen värmeöverföring $dq = 0$
- ▶ Reversibel process $dw = p dv$

Frigjord energi från bränslet

$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

Isokor process (konstant volym)

- ▶ Konstant volym $dV = 0$
- ▶ Integrera 1:a huvudsatsen

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{mix} c_v dT \Rightarrow Q_{in} = m_{mix} c_v (T_3 - T_2)$$

Viktigaste ekvationen + ideal gas

$$p v^\gamma = \text{konstant}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Isobar process (konstant tryck)

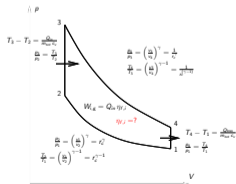
- ▶ Konstant tryck $dp = 0$
- ▶ Entalpidefinitionen + 1:a huvudsatsen

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{mix} c_p dT \Rightarrow Q_{in} = m_{mix} c_p (T_3 - T_2)$$

10/50

Cykelräkning – p_1 och T_1 givna

Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



11/50

Cykeleffektivitet forts.

Ottocykel konstant-volymsförbränning

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

Dieselykel eller cykel med konstant-trycksförbränning

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\beta^\gamma - 1}{(\beta - 1)\gamma}$$

Seiligercykel eller cykel med begränsat-tryck

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\alpha \beta^\gamma - 1}{\alpha(\beta - 1)\gamma + \alpha - 1}$$

Notera att Dieselykeln ($\alpha = 1$)
och Ottocykeln ($\alpha = 1$ och $\beta = 1$)
är specialfall av Seiligercykeln.

–Alla cykler säger att vi skall ha högt
kompressionstal!
–Vad är haken?

12/50

Några kolvar som utsatts för knock



- ▶ Knock (spikning) och oktantal hänger samman
Oktantalet är bränslets motstånd mot självantändning.
- ▶ Krav på styrsystemet
–Hantera olika bränslen.

13/50

Innehållsförteckning

Repetition

Momentmodellen

- Indikerat bruttomoment
- Tändningseffektivitet
- Medeleffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion
- Musseldiagram

Grundläggande Reglering

14/50

Medelvärdesmodell för indikerat bruttoarbete W_{ig}

- ▶ Utgår från tillgänglig energi

$$W_{ig} = m_f q_{HV} \tilde{\eta}_{ig}(\lambda_c, \theta_{ign}, r_c, \omega_e, V_d)$$

- ▶ Dra bort förlusterna från ideal Ottocykel samt verkliga förluster

$$\tilde{\eta}_{ig}(\lambda_c, \theta_{ign}, r_c, \omega_e, V_d) = \left(1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}\right) \cdot \min(1, \lambda_c) \cdot \eta_{ign}(\theta_{ign}) \cdot \eta_{ig, ch}(\omega_e, V_d)$$

- ▶ Skillnad verklig/ideal $\eta_{ig, ch}(\omega_e, V_d)$ (chamber losses)

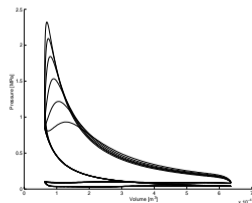
- Ändlig förbränningshastighet $\sim 2\%$
- Värmeöverföring $\sim 15\%$
- resultat $\eta_{ig, ch} \approx [0.8, 0.85]$.

- ▶ Optimal tändtidpunkt beror på . . . , momentkurvan på . . .

$$\eta_{ign}(\theta_{ign}) = 1 - C_{ign} \cdot (\theta_{ign} - \theta_{ign, opt}(\omega_e, m_f, \lambda, \dots))^2$$

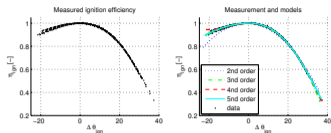
15/50

Tändningen styr arbetsproduktionen



16/50

Tändningseffektivitet



Enklaste modellen ger insikt (högre ordning ger bara bättre anpassning)

$$\eta_{ign}(\theta_{ign}) = 1 - C_{ign} \cdot (\theta_{ign} - \theta_{ign,opt}(\omega_e, m_f, \lambda, \dots))^2$$

-I projektet antar vi att vi har en regulator som ger optimal tändtidpunkt.

17/50

MEP – Ett viktigt begrepp

- Mean effective pressure – Medeleffektivt tryck

$$MEP = \frac{\text{Arbete under en cykel}}{\text{Motor Volym}} = \frac{W}{V_d}$$

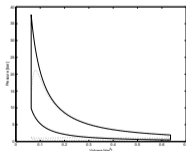
$$W = M 4 \pi$$

enheten $\text{Nm/m}^3 = \text{N/m}^2$ vilket är detsamma som tryck.

- xMEP – x anger var man mäter arbetet
 - IMEP – Indikerat arbete (cylindertryck)
 - FMEP – Friktionsarbete
 - BMEP – Bromsat arbete
 - PMEP – Pumparbete (cylindertryck)
- Max BMEP för sugmotor = ca 1 MPa (bra att komma ihåg)

18/50

Pumparbete – sista enkla åtgärden



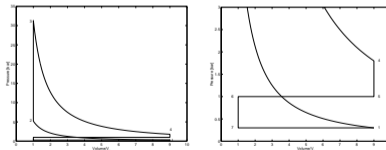
Brutto IMEP (IMEP_g gross) och netto IMEP.

$$\text{IMEP} = \text{IMEP}_g - \text{PMEP}$$

19/50

Medelvärdesmodell för pumparbete

- Deltast $p_i = 0.3 \text{ bar}$ and $p_e = 1 \text{ bar}$.

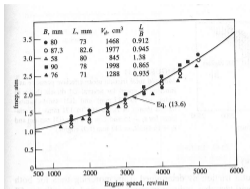


- Pumparbete (omsloten area)

$$W_p = (p_e - p_i) V_d = \text{PMEP} \cdot V_d$$

20/50

Motorfriktion – TFMEP



21/50

Motorfriktion

- Friktionen kan uttryckas i FMEP (friction mean effective pressure)

$$W_f = V_d \cdot \text{FMEP}$$

- Heywood polynomial

$$\text{FMEP} = C_{f0} + C_{f1} N + C_{f2} N^2$$

- ETH model

$$\text{FMEP} = C_{\text{min}} \cdot [(0.464 + 0.0072 S_p^{-0.8}) \cdot \Pi_{ij} \cdot 10^5 + 0.0215 \cdot \text{BMEP}] \cdot \left(\frac{0.075}{B}\right)^{0.5}$$

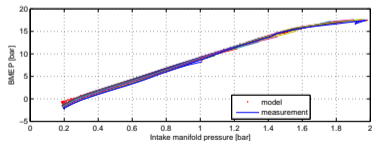
- Finns omfattande MIT modell från (1989) utvidgad (2002).
- Bra att komma ihåg
max BMEP $\approx 10^6$ Pa

$$\text{FMEP} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

22/50

Momentmodellen

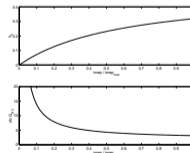
Momentet starkt kopplat till insugstrycket.



–Motivet till varför insugstrycket anses vara detsamma som last i bensinmotorer.

23/50

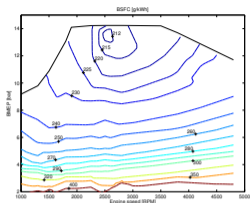
Lastberoende effektivitet



Ökande last förbättrar effektiviteten.
Indikerad η_{ind} visas också.

24/50

Musseldiagramm – "Performance map"



25 / 50

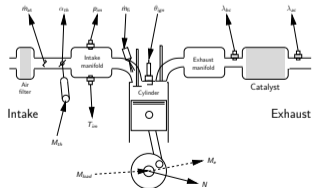
Innehållsförteckning

- Repetition
- Momentmodellen
- Grundläggande Reglering
- Reglemål – Emissioner

26 / 50

Lambda sensorer – Diskret

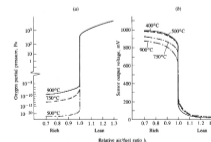
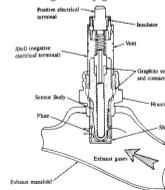
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



27 / 50

Diskret λ -sensor

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



28 / 50

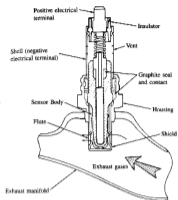
Sensormodell för diskret sensor

Sensorns 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

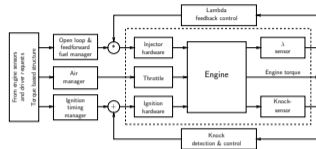
$$\lambda_{\text{sond}} = \begin{cases} 1 & \text{om } \lambda_S > 1 \\ 0 & \text{om } \lambda_S = 1 \\ -1 & \text{om } \lambda_S < 1 \end{cases}$$



29 / 50

Motorreglering - Två huvudloopar + moment

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



30 / 50

Bensinmotorreglering

Två huvudloopar för alla bensinmotorer

- ▶ Luft- och bränslereglering (Emissioner)
- ▶ Tändningsreglering (Effektivitet eller bränsleförbrukning)

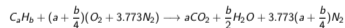
Dessutom en momentloop – Förarens begäran via gaspedal

- ▶ Styr luftmassa i cylindern (dvs insugstryck)
- ▶ Öppen styrning

31 / 50

Reglermål – Emissioner från motorn

Perfekt förbränning



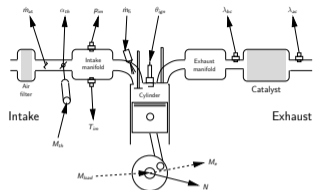
Vatten, koldioxid och kväve räknas inte som emissioner. (Minskning av koldioxidutsläpp kräver minskad bränsleförbrukning, eller att man samlar alla avgaser?)

Bildas även *NO*, *NO₂*, *CO*, och oförbrända kolväten *HC*

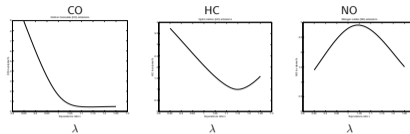
32 / 50

Emissioner efter motorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Emissionerna påverkas av luft/bränsle förhållandet



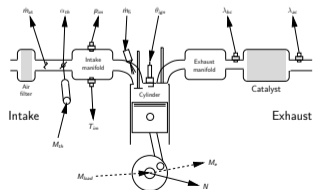
- ▶ CO, Kan förstå det mesta från reaktionsekvationen
- ▶ HC, först $\lambda < 1$ från reaktions ekvationen, instabil förbränning $\lambda > 1.3$.
- ▶ NO, temperatur (varmast runt $\lambda = 1$) och tillgång på syre.

33 / 50

34 / 50

Emissioner efter katalysatorn

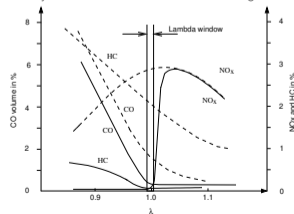
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn

heldragen - efter katalysatorn



35 / 50

36 / 50

Trevägs-katalysatorn

Trevägs-katalysatorn

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

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

Avgasrening med trevägs-katalysator - kräver reglering

37 / 50

Luft- och bränslereglring

- ▶ 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 \rightarrow spjällvinkel
Föraren \rightarrow bränslemängd
Föraren \rightarrow "luftmängd" regelsystemet styr α och \dot{m}_f .

38 / 50

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 insugssensorer (p , T), pedalrörelse, varvtalsförändring, etc.
Speed density – Mass air flow.

39 / 50

PI reglering av λ

Framkopplingen beräknar ett nominellt bränsleflöde

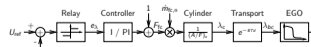
$$\dot{m}_{fc,n} = \dots$$

Återkopplingen justerar gissningen med en multiplikation

$$\dot{m}_{fc,d} = \dot{m}_{fc,n} F_{fc} = \dot{m}_{fc,n} (1 + \Delta_{fc})$$

Multiplikationen centreras runt 1.

$$F_{fc} = (1 + \Delta_{fc}) \quad \text{with} \quad \Delta_{fc} = K_I \int e_{\lambda} dt$$



40 / 50

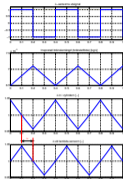
Återkopplad λ -reglering

Krav: $\lambda = 1$ stationärt (inget stationärt fel).
 Vilken är den enklaste regulatorn som uppfyller detta?
 -I-regulator!

Analys av reglersystemet

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

Integrerande regulator



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

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

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

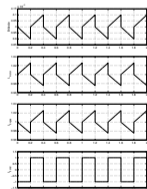
$$\lambda_{avgas} = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$$

$$\text{Självsvängningstid } T = 4\tau_d$$

41 / 50

42 / 50

PI regulator



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

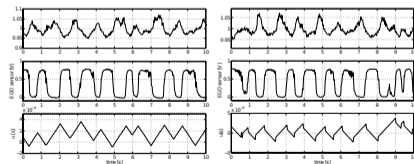
$$K_p = \frac{1}{2} \tau_d K_I$$

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

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

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

Experiment i motorlabbet



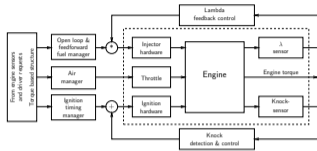
Känner igen huvuddragen
 Tuning av PI regulatorn kan göras bättre.

43 / 50

44 / 50

Framkoppling i λ -regulatorn – Transienter

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



46 / 50

Grundinsprutning & Framkopplingsloopen i λ -regulatorn

Mass air flow principle (CFI):

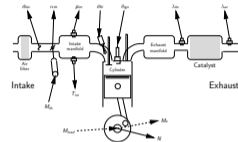
Kan mäta \dot{m}_{at}

Speed density principle (PF):

Använd η_{vol} och mät p_{im} , N , T_{im}

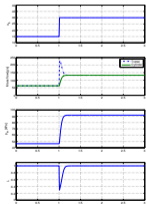
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{at}}{(A/F)_s \lambda}$$

$$\dot{m}_f = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d N}{R T_{im} n_i} \cdot \frac{1}{(A/F)_s \lambda}$$



46 / 50

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 (nästa slides):

Utnyttja η_{vol} och mät p_{im} , N samt T_{im} .

$$\dot{m}_{ac}(N, p_{im}, T_{im}) = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d N}{R T_{im} n_i}$$

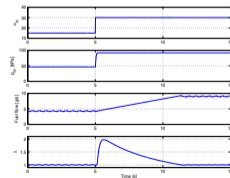
Viktiga praktiska aspekter:

Svarstid i trycksensor, filtrering, prediktering.

47 / 50

Varför räcker det inte med återkoppling?

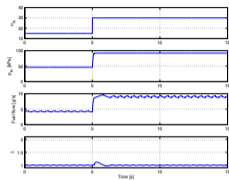
Diskret sensor, tidsfördröjning, och hårda begränsningar på λ stationärt begränsar förstärkningen.



48 / 50

Med framkoppling i λ -regulatorn

Reglering med framkoppling
(ingen kompensering för bränslefilmen)



40 / 50

Innehållsförteckning

Repetition

- Modellvalidering
- Termodynamik
- Knack – En begränsning

Momentmodellen

- Indikerat bruttomoment
- Tändningseffektivitet
- Medeleffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion
- Musseldiagram

Grundläggande Reglering

- Reglermål – Emissioner

50 / 50