

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

Fö 4 – Momentmodellen, Motorreglering

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 11, 2018

Innehållsförteckning

Repetition

- Modellvalidering
- Termodynamik
- Tillämpning på cykel
- Knack – En begränsning

Momentmodellen

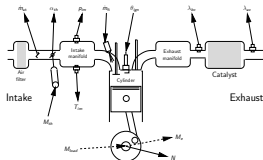
Reglering

Grundläggande Reglering

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



1 / 52

2 / 52

Modellsammanfattning 1(3)

Gaspedalstolkning 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

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

Tryckupbyggnad i insugsröret

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

3 / 52

4 / 52

Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

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

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 ...

Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

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

Bränslefilm

$$\begin{aligned} \frac{dm_{fo}}{dt} &= X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \\ \dot{m}_{fc} &= (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \end{aligned}$$

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 & Transportfördörjning

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

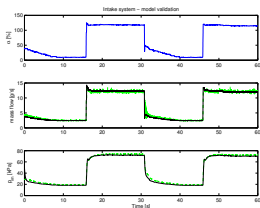
Sensordynamik

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

5 / 52

6 / 52

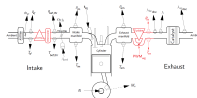
Insugsrör – Modellvalidering



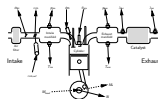
7 / 52

Modellering och beräkningar av modellparametrar

Mätningar på turbomotor i motorlabbet:



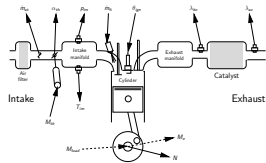
Modell i Projekt 1:



8 / 52

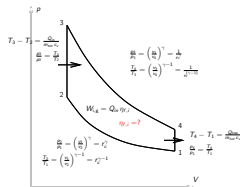
Luft och bränsle → Arbete och emissioner

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



Cykelräkning – p_1 och T_1 givna

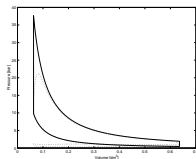
Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



9/52

10/52

Jämförelse mellan mätning och modell



Ottocykelns effektivitet

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

11/52

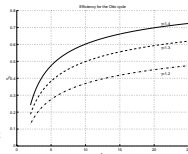
Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall $\gamma = 1.3$

γ ökar med ökande λ , lean burn engines.

Dieselmotorer kör magert och vid högre r_c , två anledningar till dess högre effektivitet.



12/52

Cykeleffektivitet forts.

Dieselrykel eller cykel med konstant-tryck

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

Seilgericykel eller cykel med begränsat-tryck

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

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

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

Några kolvar som utsatts för knack



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

13 / 52

14 / 52

Innehållsförteckning

Repetition

Momentmodellen

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

Reglering

Grundläggande Reglering

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

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

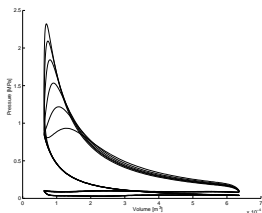
- ▶ Skillnad verklig/ideal $\eta_{ig,cb}(\omega_e, V_d)$ (chamber losses)
–Ändlig förbränningshastighet $\sim 2\%$
–Värmeöverföring $\sim 15\%$
–resultat $\eta_{ig,cb} \approx [0.8, 0.85]$.
- ▶ Optimal tändtidpunkt beror på ..., momentkurvan på ...

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

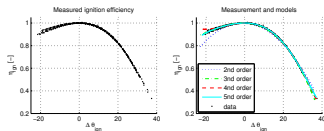
15 / 52

16 / 52

Tändningen styr arbetsproduktionen



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 / 52

18 / 52

MEP – Ett viktigt begrepp

- ▶ Mean effective pressure – Medeleffektivt tryck

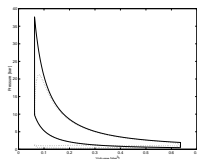
$$MEP = \frac{\text{Arbete under en cykel}}{\text{Motor Volym}} = \frac{W}{V_d}$$

$$W = M \cdot 4 \pi$$

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)

Pumparbete – sista enkla åtgärden



Brutto IMEP ($IMEP_g$ gross) och netto IMEP.

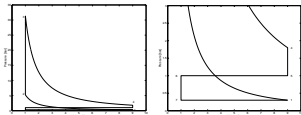
$$IMEP = IMEP_g - PME P$$

19 / 52

20 / 52

Medelvärdesmodell för pumparbete

- ▶ Dellast $p_i = 0.3$ bar and $p_e = 1$ bar.

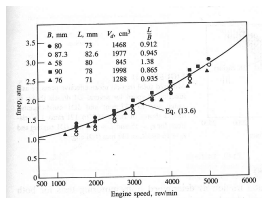


- ▶ Pumparbete (omsloten area)

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

21 / 52

Motorfriktion – TFMEP



22 / 52

Motorfriktion

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

$$W_f = V_d \cdot FMEP$$

- ▶ Heywood polynomial

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

- ▶ ETH model

$$FMEP = \bar{c}_{f,air} \cdot [(0.464 + 0.0072 S_p^{1.4}) \cdot \eta_M \cdot 10^5 + 0.0215 \cdot BMEP] \cdot \left(\frac{0.075}{B}\right)^{0.5}$$

- ▶ Finns omfattande MIT modell från (1989) utvidgad (2002).

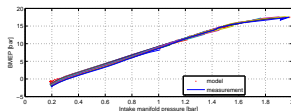
- ▶ Bra att komma ihåg
max BMEP $\approx 10^6$ Pa

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

23 / 52

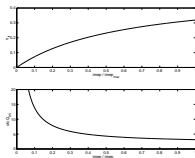
Momentmodellen

Momentet starkt kopplat till insugstrycket.



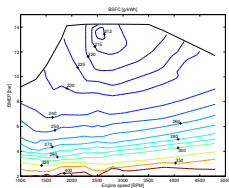
24 / 52

Lastberoende effektivitet



Ökande last förbättrar effektiviteten.
Indikerad sfc visas också.

Musseldiagram – "Performance map"



25 / 52

26 / 52

Innehållsförteckning

Repetition

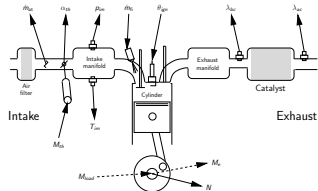
Momentmodellen

Reglering

Grundläggande Reglering

Lambda sensorer – Diskret

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.

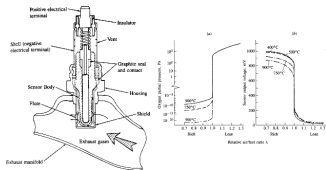


27 / 52

28 / 52

Diskret λ -sensor

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



29 / 52

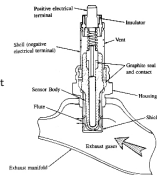
Sensormodell för diskret sensor

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

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



30 / 52

Innehållsförteckning

Repetition

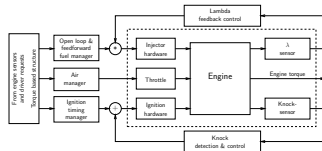
Momentmodellen

Reglering

Grundläggande Reglering
Reglermål – Emissioner

Motorreglering - Två huvudloopar + moment

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



31 / 52

32 / 52

Bensinmotorreglering

Två huvudloopar för alla bensinmotorer

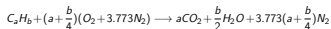
- ▶ Luft- och bränslereglring (Emissioner)
- ▶ Tändningsreglering (Effektivitet eller bränsleförbrukning)

Dessutom en momentloop – Förarens begäran via gaspedal

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

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?)

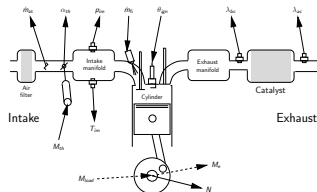
Bildas även NO , NO_2 , CO , och oförbrända kolväten HC

33 / 52

34 / 52

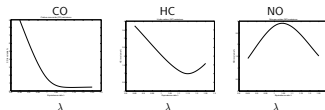
Emissioner efter motorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



35 / 52

Emissionerna påverkas av luft/bränsle förhållandet

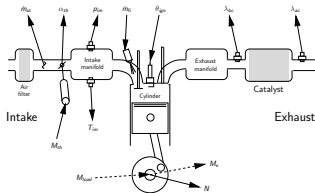


- ▶ CO, Kan förstå det mesta från reaktionsekvationen
- ▶ HC, förstå $\lambda < 1$ från reaktions ekvationen, instabil förbränning $\lambda > 1.3$.
- ▶ NO, temperatur (varmast runt $\lambda = 1$) och tillgång på syre.

36 / 52

Emissioner efter katalysatorn

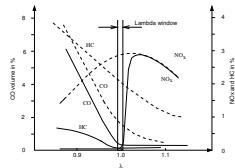
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



37 / 52

Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn heldragen - efter katalysatorn



38 / 52

Trevägskatalysatorn

Trevägskatalysatorn

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

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

Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering

Luft- och bränsleriglering

- ▶ Grunläggande mål:
Ge en förbränningsbar blandning av luft och bränsle.
- ▶ Delmål:
Reglera $\lambda = 1$ - bränsleeffektivitet (**viktigast**)
Reglera $\lambda > 1$ - skydda motor och andra komponenter
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 .

39 / 52

40 / 52

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, varvtalesförändring, etc.
Speed density – Mass air flow.

PI reglering av λ

Framkopplingen beräknar ett nominellt bränsleflöde

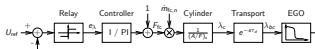
$$\dot{m}_{fc,n} = \dots$$

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.

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



41 / 52

42 / 52

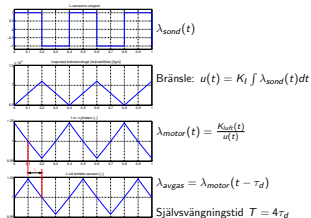
Återkopplad λ -reglering

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

Analys av regelsystemet

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

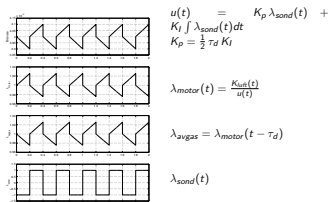
Integrerande regulator



43 / 52

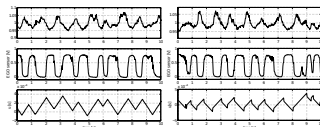
44 / 52

PI regulator



45 / 52

Experiment i motorlabbet

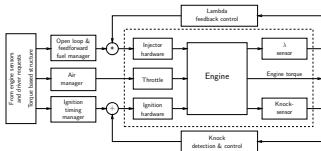


Känner igen huvuddragen
Tuning av PI regulatorm kan göras bättre.

46 / 52

Framkoppling i λ -regulatorn – Transienter

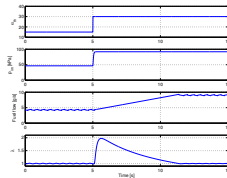
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



47 / 52

Varför räcker det inte med återkoppling?

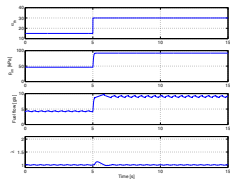
Diskret sensor, tidsfördröjning, och hårda begränsningar på λ stationärt begränsar förstärkningen.



48 / 52

Med framkoppling i λ -regulatorn

Reglering med framkoppling
(ingen kompensering för bränslefilmen)



49 / 52

Grundinsprutning & Framkopplingsloopen i λ -regulatorn

Mass air flow principle (CFI):

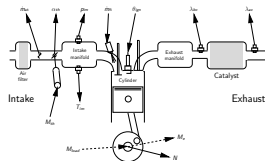
Kan mäta \dot{m}_{ac}

Speed density principle (PFI):

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

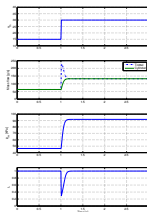
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ac}}{(A/F)_s \lambda}$$

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



50 / 52

λ -Reglering – Transient



Kan inte mäta \dot{m}_{ac}

Mass air flow principle:

Kan mäta \dot{m}_{ac}

Problem pga ej rätt flöde (se fig)

Speed density principle:

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

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

Viktiga praktiska aspekter:

Svarstid i trycksensor, filtrering, prediktering.

51 / 52

Repetition

- Modellvalidering
- Termodynamik
- Tillämpning på cykel
- Knack – En begränsning

Momentmodellen

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

Reglering

- Grundläggande Reglering
- Reglermål – Emissioner

52 / 52