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

Fö 5 – Principer och modeller för motormoment, emissioner, och körcykler

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 26, 2014

Innehållsförteckning

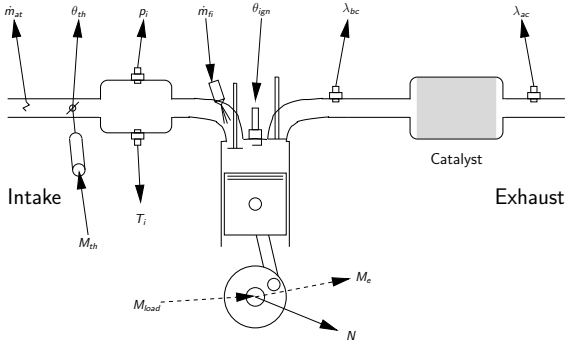
Repetition
- MVEM
- Reglering
- Cykelmodellering
- Sammanfattning av termodynamiken
- Termodynamiska system, processer, och cykler

Motor cykelräkning – Fortsättning

Motor, mer om arbetsprinciperna

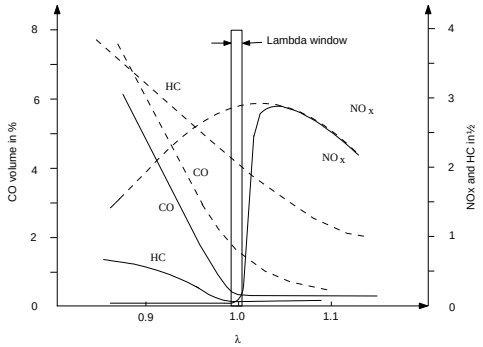
Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trevägskatalysatorn och lambdafönsteret

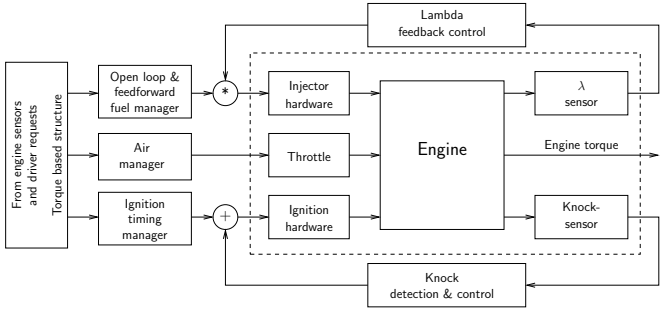
streckad - före katalysatorn heldragen - efter katalysatorn



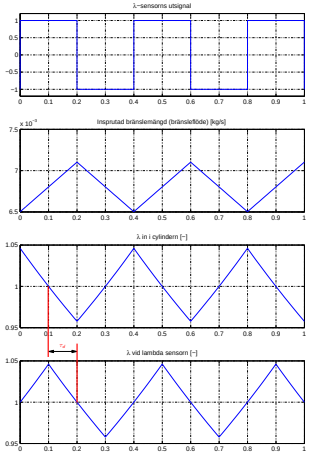
⇒ **Reglermål** $\lambda = 1$

Huvudlooparna

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



Analys av återkopplingsloop



$\lambda_{sond}(t)$

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

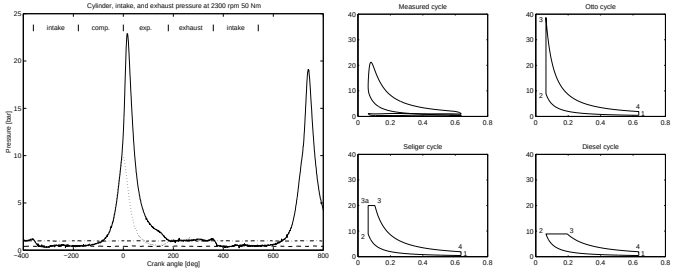
$\lambda_{motor}(t) = \frac{K_{luft}(t)}{u(t)}$

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

Självsvängningstid $T = 4\tau_d$

Indikatordiagram

Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel θ.
Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatordiagram.



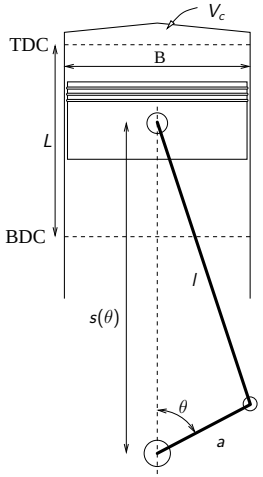
Motorgeometri ⇒ Volym

Cylinder bore	B		
Connecting rod length	l		
Crank radius	a		
Piston stroke	L	$=$	$2a$
Crank angle	θ		
Clearance volume	V_c		
Displaced volume	V_d	$=$	$\frac{\pi B^2 L}{4}$

$$r_c = \frac{\text{maximum cylinder volume}}{\text{minimum cylinder volume}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4}(l + a - s(\theta))$$

$$s(\theta) = a\cos\theta + \sqrt{l^2 - a^2\sin^2\theta}$$



En kort sammanfattning av termodynamiken

Mass specifika storheter – små bokstäver
$v = \frac{V}{m}$, $q = \frac{Q}{m}$, $u = \frac{U}{m}$, $h = \frac{H}{m}$, $w = \frac{W}{m}$

Ideal gas	$p\,V = m\,R\,T$	$p\,v = R\,T$
1:a Huvudsatsen	$dQ = dU + dW$	$dq = du + dw$
Rev. arbete	$dW = p\,dV$	$dw = p\,dv$
Entalpi	$H = U + p\,V$	$h = u + p\,v$
	$dH = dU + dp\,V + p\,dV$	$dh = du + dp\,v + p\,dv$
1:a H. (igen)	$dQ = dH - V\,dp$	$dq = dh - v\,dp$
Värmekapacitet	$C_v = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_v$	$c_v = \left(\frac{dq}{dT}\right)_v$
	$C_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_p$	$c_p = \left(\frac{dq}{dT}\right)_p$
Samband:	$du = c_v\,dT$	$dh = c_p\,dT$
Ratio of specific heats	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	$\gamma \in [1.2, 1.4]$

En kort sammanfattning av termodynamiken

- Alla gaser vi räknar på i kursen är ideala.
- Ideala gaslagen $p\,V = m\,R\,T$ och $p\,V = n\,\tilde{R}\,T$ $\qquad R = \frac{\tilde{R}}{M}$
- $\tilde{R} = 8.3143$ [J/mol K] universella gaskonstanten, $R = \tilde{R}/M$ [J/kg K] gaskonstanten.
- För en ideal gas gäller $\qquad c_p - c_v = R$
  (utgå från $h = u + pv$ och $pv = RT$)
- Kan med $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ få följande uttryck $\qquad c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$, $c_p = \frac{R}{1 - 1/\gamma}$
- Alla gaser vi räknar på har c_p och c_v konstanta.

Termodynamiska system och processer

System

- Isolerat
- Slutet
- Öppet

Processer

- *Isobar:* samma tryck $dp = 0$
- *Isokor:* samma volym $dV = 0$
- *Isoterm:* samma temp. $dT = 0$
- *Adiabatisk:* inget värmeutbyte $dQ = 0$
- *Reversibel:* $dW = p\,dV$
- *Isentropisk:* adiabatisk + reversibel (den bästa processen)

Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

Isentropisk betyder

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

–Söker samband som beskriver hur tillståndet förändras under processen
Utgå från 1:a Huvudsatsen

$$dq = du + dw \qquad \Rightarrow \qquad 0 = c_v\,dT + p\,dv$$

Ideal gas $p = \frac{RT}{v}$:

$$c_v\,dT = -\frac{RT}{v}\,dv \qquad \Leftrightarrow \qquad \frac{1}{T}dT = -\frac{R}{c_v}\frac{1}{v}\,dv \qquad \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{T}dT = -\frac{c_p - c_v}{c_v}\frac{1}{v}\,dv \qquad \Rightarrow \qquad \int_{T_1}^{T_2}\frac{1}{T}dT = -(\gamma - 1)\int_{v_1}^{v_2}\frac{1}{v}\,dv$$

Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma-1)\int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v}\, dv \quad \Rightarrow \quad \ln T_2 - \ln T_1 = -(\gamma-1)(\ln v_2 - \ln v_1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$$

$$\left[T = \frac{p\,v}{R}\right] \quad \Rightarrow \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} \quad \Leftrightarrow \quad p_2 v_2^{\gamma} = p_1\, v_1^{\gamma}$$

$$\left[v = \frac{R\,T}{p}\right] \quad \Rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Viktigaste ekvationen

$$p\,v^{\gamma} = \text{konstant}$$

Innehållsförteckning

Repetition

Motor cykelräkning – Fortsättning

Motor, mer om arbetsprinciperna

Isokor process (konstant volym) – t.ex. förbränning

- Frigjord energi från bränslet

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

- Konstant volym $\qquad dV = 0$
- 1:a huvudsatsen (energiekvationen)

$$dQ = dU + p\,dV \qquad \Rightarrow \qquad dQ = dU$$

- Inre energi $\quad U = m\,u \qquad \Rightarrow \qquad dU = m_{tot}\,du = m_{tot}\,c_v\,dT$
- Integrera 1:a huvudsatsen

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

Isobar process (konstant tryck) – t.ex. förbränning

- Frigjord energi från bränslet

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

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

$$H = U + p\,V \qquad \Rightarrow \qquad dU = dH - p\,dV - V\,dpn$$

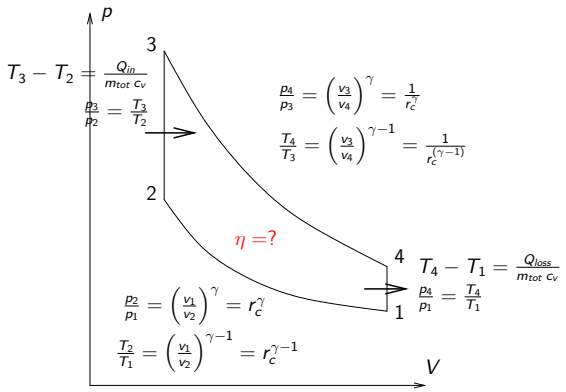
$$dQ = dU + p\,dV = dH - V\,dp \qquad \Rightarrow \qquad dQ = dH$$

- Entalpi $\qquad H = m\,h \qquad \Rightarrow \qquad dH = m_{tot}\,dh = m_{tot}\,c_p\,dT$
- Integrera 1:a huvudsatsen

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

Cykelräkning – p_1 och T_1 givna

Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



Innehållsförteckning

Repetition

Motor cykelräkning – Fortsättning

Motor, mer om arbetsprinciperna
- De ideala cyklernas effektivitet
- Knack – En begränsning
- Indikerat bruttomoment
- Tändningseffektivitet
- Medeleffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion
- Musseldiagram

Ideala Ottocykelns effektivitet

- Verkningsgrad $\eta_{otto} = \frac{\text{Arbete ut}}{\text{Tillförd energi}}$
- Känner "tillförd energi" Q_{in}
- Två sätt att beräkna "arbete ut" W_{out}
  – Integrera arean $W_{out} = \oint p\, dV$
  Lösa två integraler $\int c \cdot V^{-\gamma} dV$
  – Första lagen: efter en cykel har U inte ändrats

$$dQ = dU + dW \Rightarrow \Delta Q = \Delta W$$

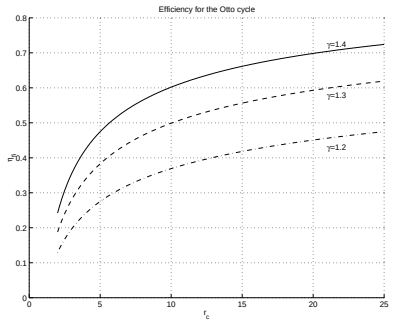
$$\Delta W = W_{out} \qquad \Delta Q = Q_{in} - Q_{loss}$$

- $\eta_{otto} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$

Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall $\gamma = 1.3$



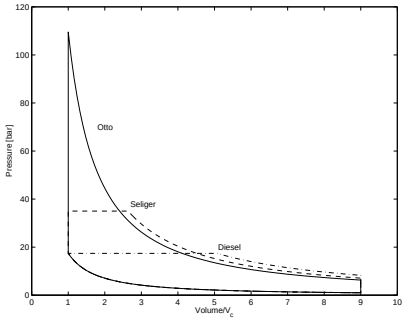
Jämför $r_c = 10$ med $r_c = 5$
i ett pV-diagram.
Var förlorar man?

Cykeleffektiviteten och pV-diagramet

$\eta_{f,i} = \frac{W_i}{Q_{in}}$

Förutsättning:
Samma Q_{in}.

Vad syns i diagrammet?



$\eta_{Otto} > \eta_{Seiliger} > \eta_{Diesel}$

Cykeleffektivitet forts.

Dieselcykel eller cykel med konstant-tryck

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

Seiligercykel eller cykel med begränsat-tryck

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

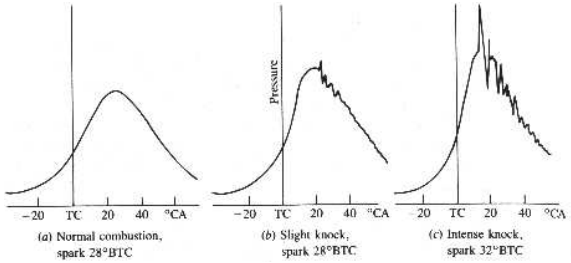
Notera att Dieselcykeln ($\alpha = 1$)
och Ottocykeln ($\alpha = 1$ och $\beta = 1$)
är specialfall av Seiligercykeln.

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

Några kolvar som utsatts för knack

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

Knack – En begränsning för bensinmotorer



–Knack kan förstöra motorn!
–Mer om det nästa läsperiod...

Medelvärdesmodell för indikerat bruttoarbete W_{ig}

- Utgår från tillgänglig energi

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

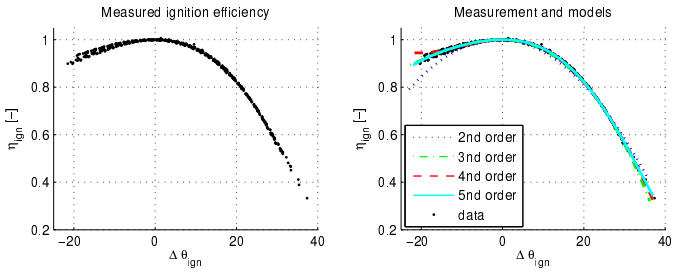
- Dra bort ideal Ottocykel samt verkliga förluster

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

- 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 ...

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

Tändningseffektivitet



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

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

MEP – Ett viktigt begrepp

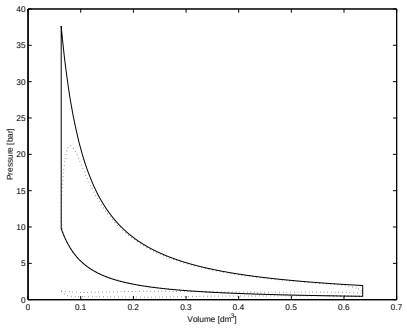
- Mean effective pressure – Medeleffektivt tryck

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

$$W = M\,4\,\pi$$

  enheten Nm/m^3=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

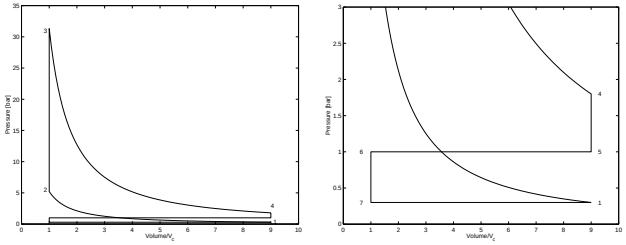


Brutto IMEP (IMEP$_g$ gross) och netto IMEP.

IMEP = IMEP$_g$ - PMEP.

Medelvärdesmodell för pumparbete

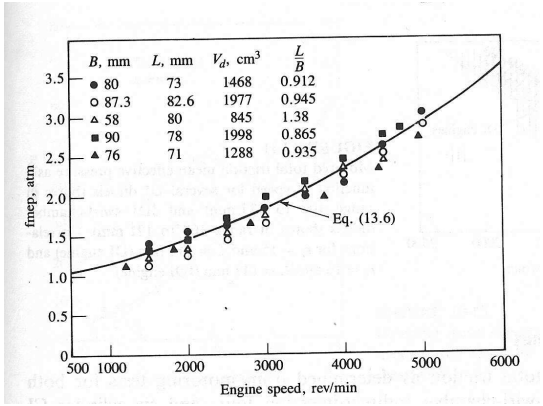
- Dellast $p_i = 0.3$ bar and $p_e = 1$ bar.



- Pumparbete (omsluten area)

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

Motorfriktion – TFMEP



Motorfriktion

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

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

- Heywood polynomial

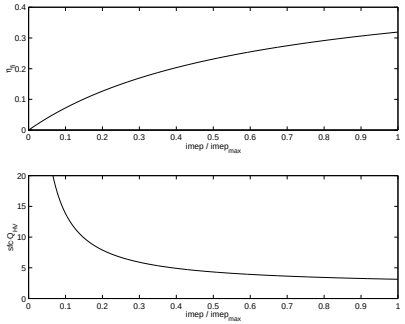
$$FMEP = C_{f0} + C_{f1}\, N + C_{f2}\, N^2$$

- ETH model

$$\mathrm{FMEP} = \xi_{aux} \cdot [(0.464 + 0.0072\, S_p{}^{1.8}) \cdot \Pi_{bl} \cdot 10^5 + 0.0215 \cdot \mathrm{BMEP}] \cdot \left(\frac{0.075}{B}\right)^{0.5}$$

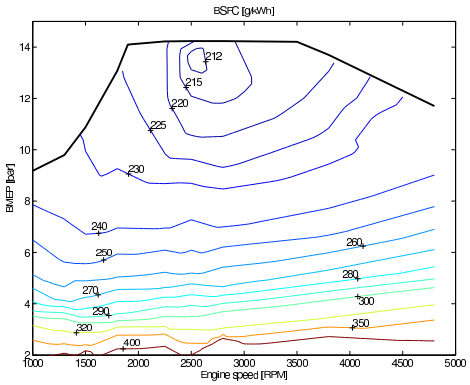
- Finns omfattande MIT modell från (1989) utvidgad (2002).
- Bra att komma ihåg
  max $BMEP \approx 10^6$ Pa $\qquad$ $FMEP \approx 10^5$ Pa

Lastberoende effektivitet



Ökande last förbättrar effektiviteten.
Indikerad *sfc* visas också.

Musseldiagram – “Performance map”



Repetition
- MVEM
- Reglering
- Cykelmodellering
- Sammanfattning av termodynamiken
- Termodynamiska system, processer, och cykler

Motor cykelräkning – Fortsättning

Motor, mer om arbetsprinciperna
- De ideala cyklernas effektivitet
- Knack – En begränsning
- Indikerat bruttomoment
- Tändningseffektivitet
- Medeleffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion
- Musseldiagram