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

Fö 4 – Emissioner samt Momentmodellen

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 13, 2013

Innehållsförteckning

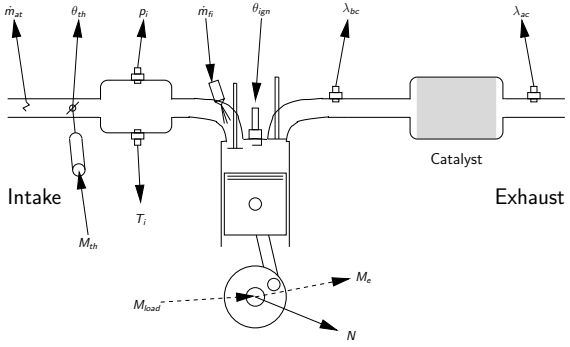
Repetition
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

Emissioner

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Modellsammanfattning 1(2)

Gaspedalstolkning och trottelposition

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

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

Luftflöde in i insugsröret

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

Luftflöde in i cylindern

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

Tryckuppbyggnad i insugsröret

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

Modellsammanfattning 2(2)

Bränsleinjektor - Port inj.

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

Bränslefilm

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

Bränsleinjektor - Direkt inj.

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

λ till motor

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

Gasblandning & Transportfördröjning

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

Sensordynamik

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

Innehållsförteckning

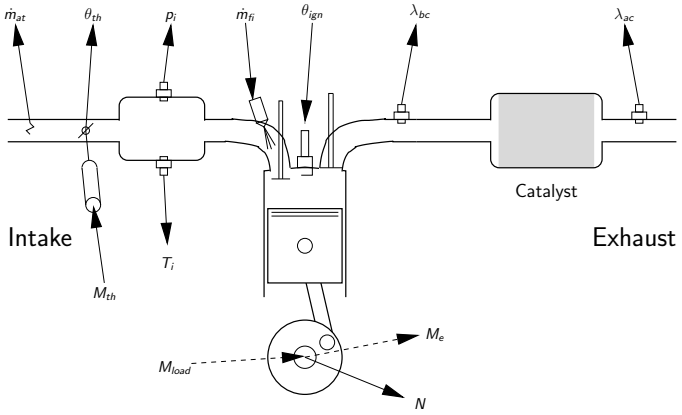
Repetition
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

Emissioner

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper

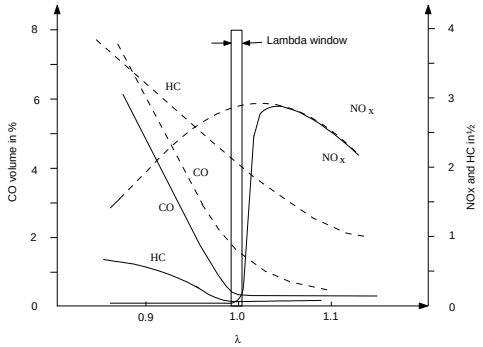
Emissioner före och efter katalysatorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trevägskatalysatorn och lambdafönsteret

streckad - före katalysatorn heldragen - efter katalysatorn



Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering

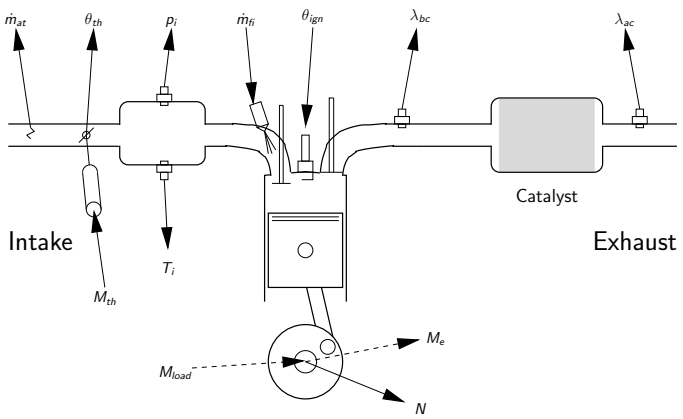
λ-reglering ($\lambda = 1 \pm 0.03$)

- Hårt krav och modellosäkerheter $\Rightarrow$ **Återkoppling** nödvändig.
  - Stationärt $\lambda = 1$:
  - Återkopping 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.
- Två olika principer

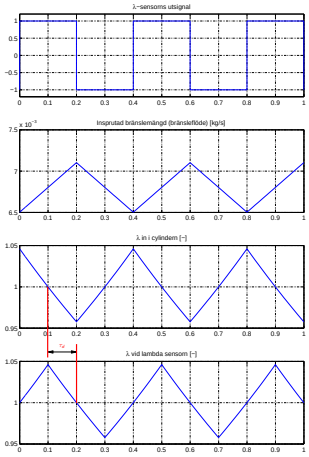
  Speed density – Mass air flow.

Återkoppling med reläsensor

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Integrerande regulator



$\lambda_{sond}(t)$

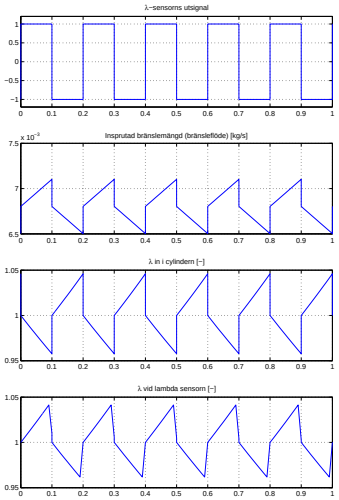
Bränsle: $u(t) = K_I \int \lambda_{sond}(t)dt$

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

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

Självsvängningstid $T = 4\tau_d$

PI regulator



$\lambda_{sond}(t)$

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

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

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

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

Självsvängningstid $T = 2\tau_d$

Innehållsförteckning

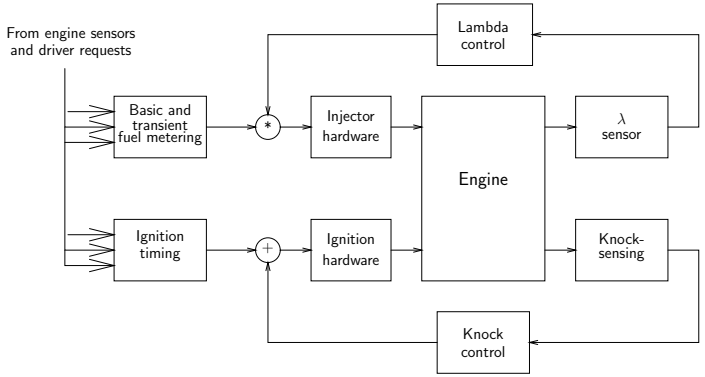
Repetition
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

Emissioner

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper

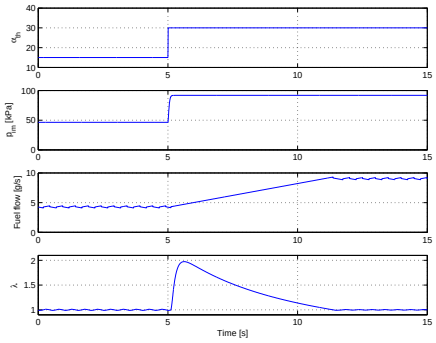
Framkoppling för λ-reglering – Transienter

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



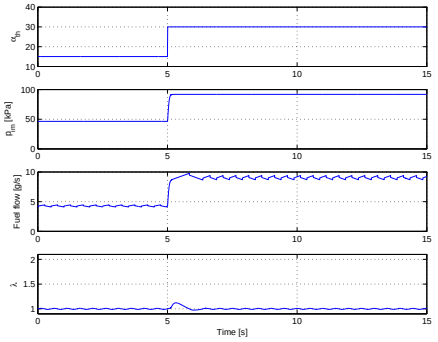
Varför är inte återkoppling tillräckligt?

Reläsensor, tidsfördröjning, hårda krav på lambda stationärt begränsar förstärkningen.

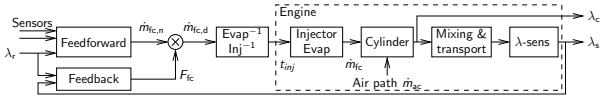


λ-reglering – Framkopplingsloopen

Reglering med framkoppling (ingen bränslefilmskompensering)



λ-reglering – Projektet



- Fram- och återkoppling i samverkan
- Direktinsprutad motor: ingen bränslepölsdynamik

Innehållsförteckning

Repetition

Emissioner
Lagstiftning och Testcykler

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper

Emissioner

$$C_aH_b+(a+\frac{b}{4})(O_2+3.773N_2) \longrightarrow a\,CO_2+\frac{b}{2}\,H_2O+3.773\,(a+\frac{b}{4})\,N_2$$

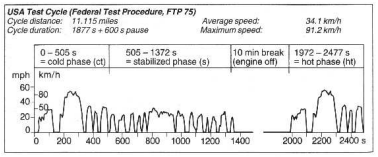
- Vatten, koldioxid och kväve räknas inte som emissioner.
- Minskning av koldioxidutsläpp kräver
  - minskad bränsleförbrukning
  - byter bränsle t.ex. mot metan CH_4 eller biobränslen
  - samlar in avgaser...
- Bildas även NO, NO_2, CO, och oförbrända kolväten HC. NO_x samlingsnamn på NO, NO_2, ...

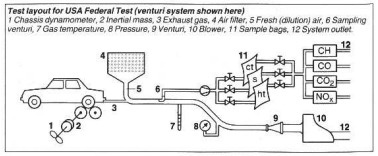
Emissioner – Lagstiftning

- Internationellt enhetliga procedurer för uppsamling av avgaser och mätningar.
- Hel bil i chassi-dynamometer (Jfr Bilprovning)
- Olika körcykler i olika länder. Förare håller hastigheten.
- CVS-metoden – (Constant Volume Sampling)
- Utspädning 1:10
  Fördelar: Slipper kondensation av vattenånga, vilket skulle reducera NO_x. Minskar reaktionstendensen i avgaserna.
  Nackdel: Svårare mätning ty lägre koncentration

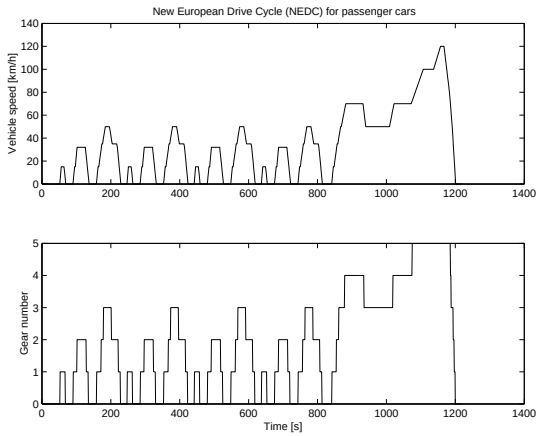
US federal test procedure FTP 75 (Tre faser)

Komb. m. SHED (Sealed Housing for Evaporative Determiantion).





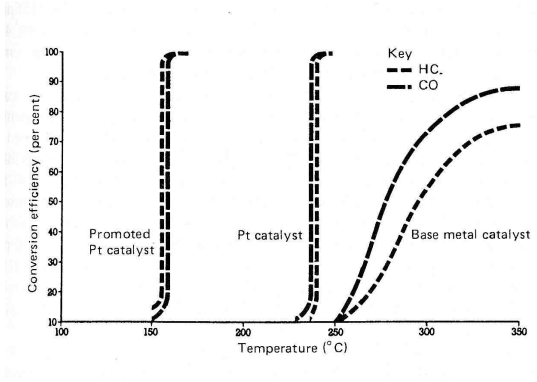
New European Driving Cycle – NEDC (Proj. 1c)



Emissionsgränser, bensindriven personbil, USA (g/mile)

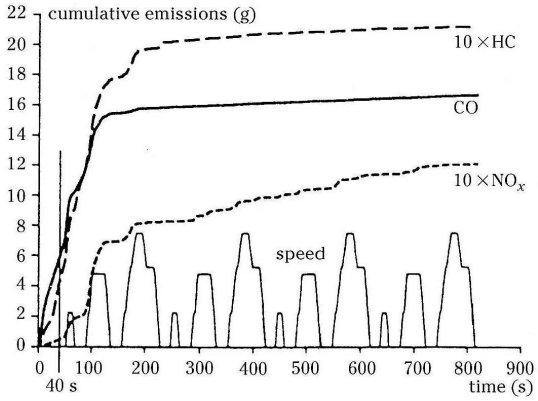
year	CO g/mile	HC g/mile	NO_x g/mile	Metods
1966	87.0	8.800	3.60	Pre control
1970	34.0	4.100	4.00	Retarded ignition, thermal reactors, and exhaust gas recirculation (EGR)
1974	28.0	3.000	3.10	Same as above
1975	15.0	1.500	3.10	Oxidizing catalysts
1977	15.0	1.500	2.00	Ox.cat. and improved EGR
1980	7.0	0.410	2.00	Improved ox.cat. and three way catalysts
1981	7.0	0.410	1.00	Improved threeway catalyst and support material
1983	3.4	0.410	1.00	Continuous improvements
1994	3.4	0.250	0.40	
1996	3.4	0.125	0.40	
2001	3.4	0.075	0.20	
⋮	⋮	⋮	⋮	

Katalysator effektivitet och temperatur



Vid start T≈ 20° C. ⇒ Gaserna efterbehandlas inte.

Emissioner under en europeisk körcykel



Enkel medelvärdesmodell: Light-off tid.

Innehållsförteckning

Repetition

Emissioner

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper

Momentmodellen

Theorem

Arbetet (momentet) från motorn kan approximeras av

$$M_b \, 2 \, n_r \, \pi = W_b = W_{ig} - W_{pump} - W_{fric}$$

$$\begin{aligned} W_{ig} &= m_f \, q_{HV} \, \tilde{\eta}_{ig}(\lambda_c, \theta_{ign}, r_c, \omega_e, V_d) \\ W_{pump} &= PMEP(p_i, p_e) \, V_D \\ W_{fric} &= FMEP(N, p_i) \, V_D \end{aligned}$$

Proof

Resten av denna och nästa föreläsning.

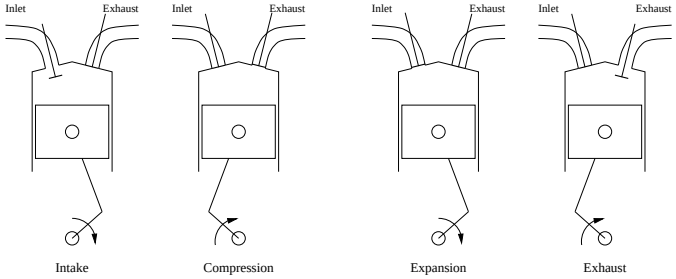
Real Proof

Validering mot mätdata

Nästa område: Cykel-modellering

- Arbetscykeln
- Grundläggande begrepp
- Termodynamik
- Tillämpning på cykel

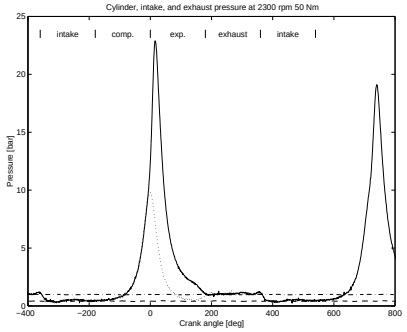
Fyrtaktsprincipen



En cykel = 2 varv = 4π

Indikatordiagram

Indikatordiagram – Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel θ



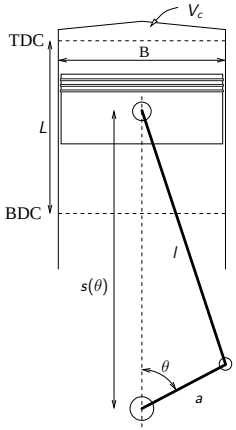
Motorgeometri ⇒ Volym

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	$=$	$\frac{\pi B^2 L}{4}$

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

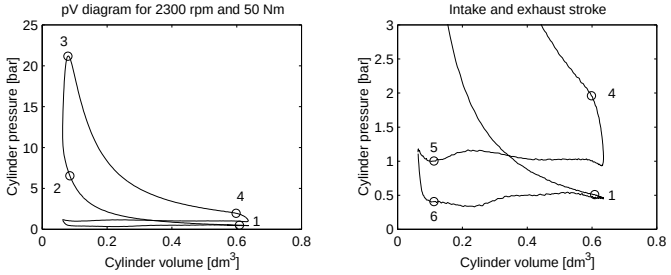
$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4}(l + a - s(\theta))$$

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



Indikatordiagram

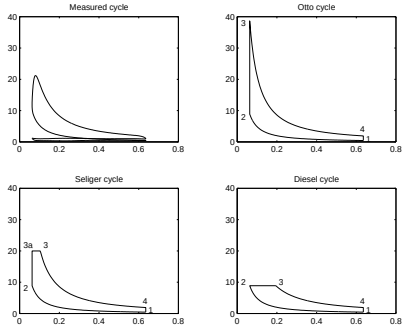
Samma indikatordiagram omräknat till pV-diagram



Varför pV-diagram?
–Arbetet kan räknas fram genom $W = \oint p dV$!

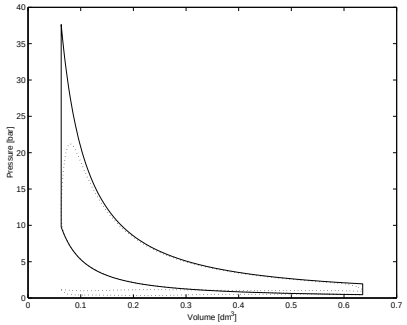
Cykler

Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatordiagram



Viktigt att göra skillnad på:
Ottomotor $\neq$ Ottocykel Dieselmotor $\neq$ Dieselcykel

Jämförelse mellan mätning och modell



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

Repetition
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

Emissioner
- Lagstiftning och Testcykler

Momentmodellen – Motor, arbetsprinciper