

TSFS09 – Modelling and Reglering av Motorer och Drivlinor – Fö 8

Motor – Övergripande reglering, tändning, tomgång, knack och knackreglering

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

November 6, 2019

1 / 65

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Tändningsreglering

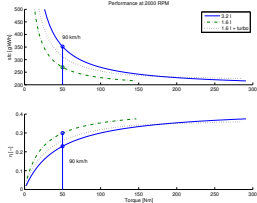
Ytterligare detaljer om Motor

Jonströmmar

2 / 65

Nedskalning och överladdning

3.2 liter ↔ 1.6 liter ↔ 1.6 liter turbo



3 / 65

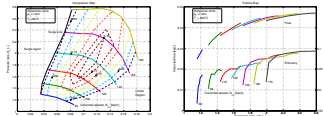
Kompressor och Turbin – Modeller

Grundläggande princip – Generaliserade restriktioner i MVEM

$$\dot{m}_{corr} = f_1(\Pi, N_{corr})$$

$$\eta = f_2(\Pi, N_{corr})$$

$$W = f_3(\Pi, N_{corr}, p_{in}, T_{in})$$



Korrigerade storheter N_{corr} , \dot{m}_{corr}

Tryckkvot Π_c Expansionsförhållande $1/\Pi_t$

Genomgång av implementation och användning på tavlan Fö 7.
Viktig!

4 / 65

Viktiga delar ur genomgången

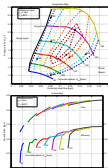
Beräkningsschema

$$[W, \dot{m}, T_{flow}] = f(\rho_{01}, \rho_{02}, T_{01}, N_c)$$

- ▶ Korrigering $\Rightarrow N_{corr}, \Pi_c$
- ▶ Använd "mappen" för att beräkna $\dot{m}_{c,corr}$
- ▶ Avkorrigera $\dot{m}_{c,corr}$ för att få \dot{m}_c
- ▶ Använd "mappen" för att beräkna η_c
- ▶ Beräkna $T_{flow} = T_{02}$ från η_c -definitionen.
- ▶ Beräkna kompressoreffekten

$$\dot{W}_c = \dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})$$

- ▶ P.S.S. för Turbinen
- ▶ Newtons andra lag med effektbalansen ger turbovarvtal.



5 / 65

Extramaterial - Bonus

Exempel på SAE-mapp(ar)

6 / 65

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Repetition - Historik

Momentbaserad reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Tändningsreglering

Ytterligare detaljer om Motor

Jonströmmar

7 / 65

Motorreglering – Kort historik

På T-forden:

Manuell reglering av

–Handgas

–Tändningsinställning

“Köra med slokande mustascher”

Senare (i Ford Mustang m.fl.):

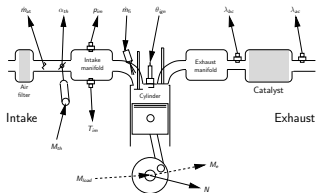
- ▶ Gaspedal
- ▶ Tändningsinställning genom mekaniskt system; centrifugalregulator och vakuumklocka i fördelaren.



8 / 65

Motorreglering - Sensorbaserad reglering

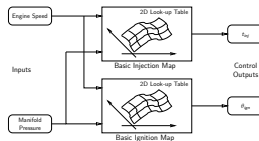
Första steget i elektroniska EMS (Engine Management Systems)



9 / 65

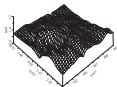
Motorreglering - Mappbaserad reglering

Illustration av hur mappar kan användas för att uppfylla det grundläggande reglerna för bränsle- och tändningsreglering. Målen uppnås via injektoröppningstid t_{inj} och tändvinkel θ_{ign} i ett regelsystem.

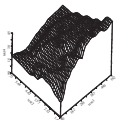


10 / 65

Engine control - Map based control



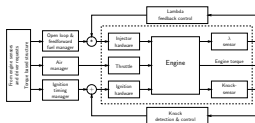
Mapbaserad reglering kan utvidgas och optimeras till mycket stor förfiningsgrad.



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

11 / 65

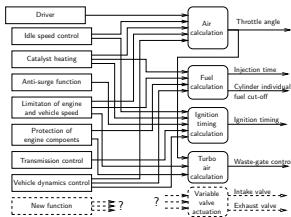
Motorreglering - De tre huvudlooparna



De olika regulatorerna kan vara
 -ad hoc lösningar
 -baserade på mappar
 -modellbaserade designmetoder

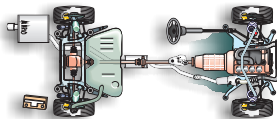
12 / 65

Styrsystemen blir mer och mer komplexa – Ohållbart



13 / 65

Momentbaserad reglering

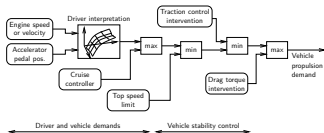


Vad vill föraren uppnå när han trampar på gasen?

- Tolka föraren, propagera tolkning från fordonsbetende till motor.

14 / 65

Momentbaserad struktur – Fordon

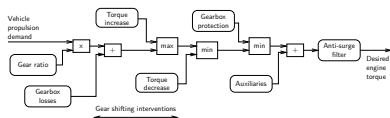


Från förare till hjulmoment

- Mycket arbete bakom förtolkning

15 / 65

Momentbaserad struktur – Drivlina

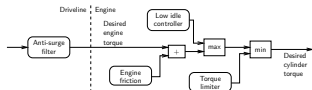


Från hjul till motor

- Anti-surge: Nästa projekt, drivlinereglering

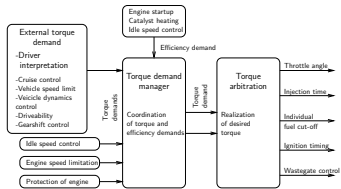
16 / 65

Momentbaserad struktur – Motor



17 / 65

Momentbaserad struktur – Översikt med aktuatorer



18 / 65

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Tändningsreglering

Ytterligare detaljer om Motor

Jonströmmar

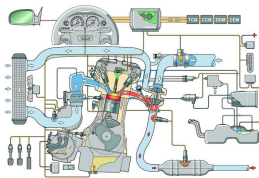
19 / 65

Referensvärden för att nå önskat Moment

- ▶ Grundprincip invertera momentmodellen (med fyllnadsgraden)
 - Lös ut trycket i insugsröret p_{im}
- ▶ Trottelregulator reglerar trycket p_{im}
 - ▶ Återkoppling
 - ▶ Framkoppling
- ▶ Påverkar luftflödet, bränslet regleras med λ -regulatorn
 - Framkoppling från insugstrycket
- ▶ Hur gör man i turbofallet?
- ▶ På samma sätt: reglerar laddtrycket.
- ▶ Extra komplikation: Två tryck, före och efter trottlet.
- ▶ Två aktuatorer: Wastegate resp. Trottel används.
- ▶ En extra frihetsgrad \Rightarrow kan optimera...

20 / 65

Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator

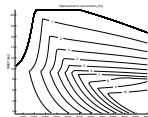
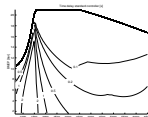


Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator

Förändring från tidsoptimal till bränsleoptimal

Extra svarstid

Vinst i bränsle



Detaljer i Eriksson et. al. (2002), "Control and Optimization of Turbocharged Spark Ignited Engines"

21 / 65

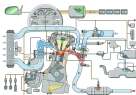
22 / 65

Trade-off – Ställ in acceptabel förlust över trottel

- ▶ Börvärde för kompressortryck:

$$p_c \approx p_{ic} = p_{im} + \Delta p_{th}$$

- ▶ PI regulator: $u_{wg} = PID(p_{ic} - (p_{im} + \Delta p_{th}))$
- ▶ ECO-/Sportsmode: Välj Δp_{th} beroende på mod.
- ▶ Problem vid implementering:
 - WG aktuatorn ligger ofta begränsningarna.
 - ▶ Ger problem med I-delen – Windup.
 - ▶ I projektet: Anti-Windup implementerat åt er. (Reklam för industriell reglerteknik)



Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Oktantal

Oktantal & Knack

Tändningsreglering

Ytterligare detaljer om Motor

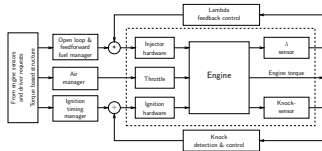
Jonströmmar

23 / 65

24 / 65

Tändningsloopen

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



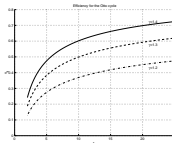
25 / 65

Repetition – Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall $\gamma = 1.3$

$\eta_{f,i}$ ökar med r_c för alla cykler.
Varför designar vi inte för $r_c = \infty$?



26 / 65

En kolv som upplevt kraftigt knack



27 / 65

En annan kolv som upplevt kraftigt knack

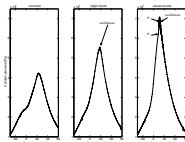


-Knack kan förstöra motorn!!!

28 / 65

Knack – En fundamental begränsning för bensinmotorn

Hur kan man detektera knock?



Knack och oktantal är relaterade.

Oktantal – Bränslets förmåga att "motstå knock".

Knack – Oktantal

Bränslets oktantal:

Motstånd mot självantändning vid höga kompressioner.

Definierar referensbränslen:

- ▶ n-heptan ON=0. Lång rak molekyl
- ▶ isooktan ON=100. Kort kompakt molekyl.

Hur bestäms oktantalet?

29 / 65

30 / 65

Oktantal

- ▶ RON – Research Octane Number
Europa, Sydafrika, Australien
- ▶ MON – Motor Octane Number
Motorsport, Högre temperatur och varvtal på motorn.
8 till 10 enheter lägre än RON.
- ▶ $(RON+MON)/2$ – Används i USA och Kanada
AKI – Anti Knock Index
PON – Pump Octane Number
- ▶ RdON – Road Octane Number
 $RdON = aRON + bMON + c$, Erfarenhet har visat
 $a = b = 0.5, c = 0$
- ▶ Fuel sensitivity = RON - MON

RON & MON

Arbetspunkter för ON bestämning

	Research	Motor
Engine speed	600 rpm	900 rpm
Ignition timing	13° BTDC	19 – 26° BTDC
	fixed	$f(r_c)$
Inlet temperature	52°C (125°F)	149°C (300°F)
Inlet pressure		1 atm
Humidity	0.0036-0.0072 kg/kg dry air	
Coolant temperature		100°C
Air to fuel ratio	Adjusted for maximum knock	

Hur bestämmer man ON > 100?

Referensbränsle: iso-oktan + blyadditiv, $T = \frac{T \text{ milliliter } (C_2H_6)_2Pb}{1 \text{ gallon iso-octane}}$

$$ON = 100 + \frac{28.28 T}{1.0 + 0.736 T + (1.0 + 1.472 T - 0.035216 T^2)^{0.5}}$$

31 / 65

32 / 65

Litet mer om varför kompressionen är begränsad?

Alla cykler visar att högre kompressionstal ger bättre effektivitet, vad är problemet?

- ▶ begränsning på maxtrycket
- ▶ värmeöverföring $dQ \neq 0$
- ▶ ökade emissioner

En dieselmotor har högre kompressionstal än en bensinmotor, och det är ett av skälen till dieselmotorns högre effektivitet.

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Tändningsreglering

Samverkan tändning, moment

Tändning och knack

Motor – Moment

Ytterligare detaljer om Motor

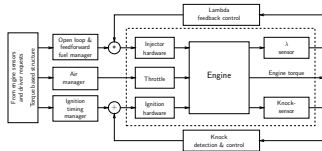
Jonströmmar

33 / 65

34 / 65

Tändningsloopen

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



35 / 65

Tändningsreglering

Varför: Tända blandningen. Bra bränsleekonomi.

Vad: Ger en gnista i cylindern som startar förbränningen i rätt ögonblick.

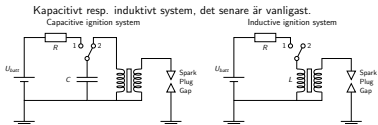
Hur: Laddar upp kondensator eller spole och laddar ur den genom gnistgapet i tändstiftet.

Utmaningar: Bra bränsleekonomi i alla driftsfall.
Hålla knack borta.
Kalibrering ↔ Slutna loop reglering.

- ▶ Tändtidpunkt
- ▶ Tändenergi

36 / 65

Tändningsreglering – Hårdvara

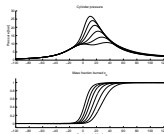


37 / 65

Tändningstidpunkt \longleftrightarrow Cylindertryck och MFB

Positionerar förbränningen relativt kolvrörelsen och styr pV-diagrammet

Sex cylindertryck i arbetspunkten 2000 rpm 50 Nm.

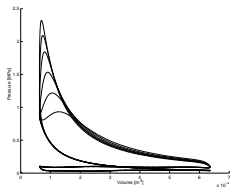


Var finns tändtidpunkten?

Var finns PPP och $x_b = 0.5$?

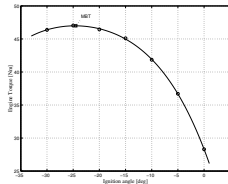
38 / 65

Tändningstidpunkt \longleftrightarrow pV-diagram



39 / 65

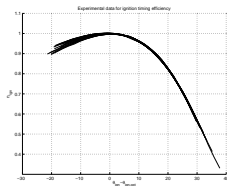
Bränsleförbrukning–Moment, Tändningstidpunkt och MBT



40 / 65

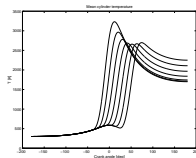
Tändkrokar – "Ignition Fish Hooks"

Centrerat runt $\Delta\theta = \theta_{ign} - \theta_{ign,opt}$



Tändtidpunktens betydelse för emissionerna

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.

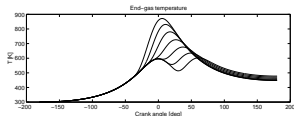


Höga maxtemperaturer medför att mer NO_x bildas.
Tidig tändning ger också högre tryck (mekanisk påfrestning) och HC utsläpp.

41 / 65

42 / 65

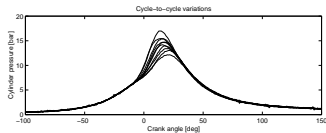
Knackrisk som funktion av tändtidpunkt



Ändgastemperaturen för olika tändtidpunkter. Senare tändtidpunkt ger lägre temperaturer.
Knackreglering

Cykel till cykel variationer

Alla styrvariabler konstanta, lambda reglering urkopplad.
10 konsekutiva cykler



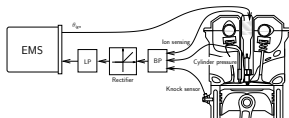
En cykel med snabb förbränning är mer benägen att knacka.

43 / 65

44 / 65

Knackdetektering – Hårdvara

Bandpassfiltrera signalen – Likrikta (eller kvadrera) – Integrera

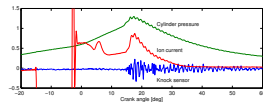


Tidsfönster i vevaxeldomänen och mät energiinnehållet E_i för cykel i .

45 / 65

Knackdetektering – Signalerna

Tre signaler med ringning i frekvensbandet för cylinderns egenmod.



46 / 65

Knackreglering – Söka sig mot knock gränsen

Vid detektering flytta snabbt bort, gå sedan mot gränsen.

if ($E_i > limit$)

$$\alpha = \alpha + \beta$$

else

$$\alpha = \min(\alpha - \gamma, 0)$$

end

$$\theta_{ign} = \theta_H + \alpha$$

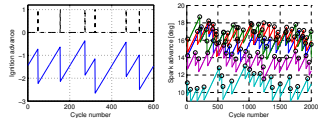
β - stor för snabbt skydd

γ - liten för att gå sakta mot gränsen

47 / 65

Knackreglering – Söka sig mot knockgränsen

Illustration av knock reglering med justering β nedåt γ uppåt.



48 / 65

Knackreglering

Knackreglering kompenserar för inverkan av parametervariationer.

- ▶ Omgivningstemperatur
- ▶ Omgivningstryck vid olika höjder
- ▶ Oktantal för olika bränslen
- ▶ Motorernas tillverkningstolerans och åldring

Kompressionsförhållandet kan ökas med 1 enhet.

Återkopplad reglering, jämfört med konservativ kalibrering:

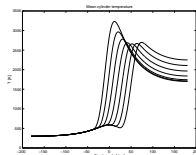
Bränsleförbrukningen reduceras med omkring 7 %.

För turboladdade motorer är vinsterna större.

49 / 65

Tändtidpunktens betydelse för avgastemperaturen

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.

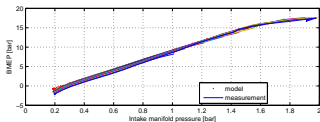


Sen tändning ger högre avgastemperatur.

–Hög last och knack, skydda katalysator med andra motmedel ($\lambda < 1$). –Kallstart, värma katalysator med sen tändning.

50 / 65

Motormoment och insugstryck



Korrelation, som motiverar varför insugstrycket används som synonym för last.

Affin modell enkel och god approximation.

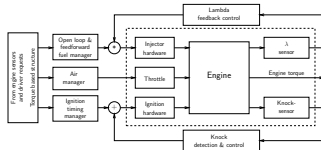
Vid höga laster:

–Kompromissar på tändningen (sänker effektiviteten) för att skydda motorn mot knack.

51 / 65

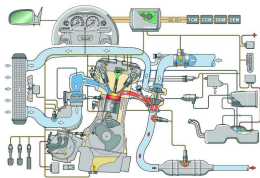
Huvudlooparna – Tändning

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



52 / 65

Samtidig tändning och turbotryck – APC



53 / 65

Momentstyrning med tändning

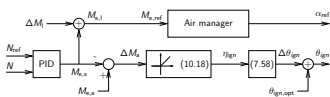
Snabb aktuator för moment.

- ▶ Moment neddragning vid växlingar.
- ▶ Hjälp vid tomgångsreglering.
- ▶ Vid ytterligare moment neddrag används "fuel cut".

54 / 65

Tomgångsreglering med stöd från tändningen

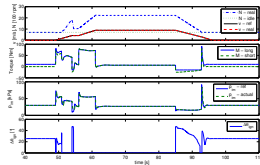
Två aktuatorer för momentet: luft och tändning.



55 / 65

Tomgångsreglering med stöd från tändningen

Första delen av NEDC, tomgångsreglering aktiv.



56 / 65

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Turboreglering

Motor – Knack

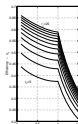
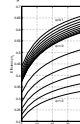
Tändningsreglering

Ytterligare detaljer om Motor

Jonströmmar

Fortsatt analys av arbetsprocessen

Ideal Ottocykel, icke idealgas (c_p och c_v varierar).
Cykeleffektivitet som funktion av $\phi = 1/\lambda$ och r_c .



Högre r_c ger högre η

γ ökar när ϕ minskar

Knä vid $\phi = 1$

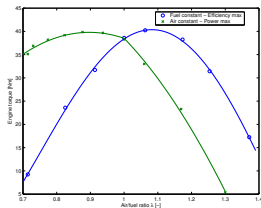
Jfr momentmodellen
 $\min(1, \lambda) = \min(1, \frac{1}{\phi})$

"Fullständig" förbränning

57 / 65

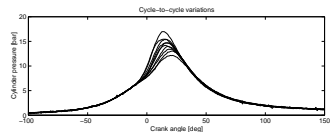
58 / 65

λ -svep – Mätningar på en Ottomotor



Cykel till cykel variationer

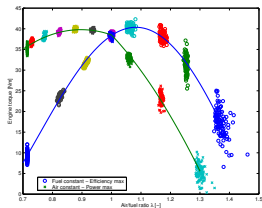
Alla styrvariabler konstanta, lambda reglering urkopplad.
10 konsekutiva cykler



59 / 65

60 / 65

Minst variation runt $\lambda = 0.9$



Innehållsförteckning

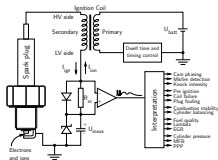
- Motor – Repetition
- Övergripande Reglering
- Turboreglering
- Motor – Knack
- Tändningsreglering
- Ytterligare detaljer om Motor
- Jonströmmar

61 / 65

62 / 65

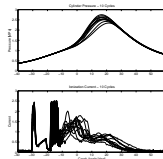
Jonströmmar

Använd tändstiftet när det inte används för tändning



63 / 65

Jonströmmar och cylindertrycket



Direkt mätning i cylindern. Återkoppling från förbränningen.

64 / 65

Innehållsförteckning

Motor – Repetition

Övergripande Reglering

Repetition - Historik

Momentbaserad reglering

Turboreglering

Motor – Knack

Oktantal

Oktantal & Knack

Tändningsreglering

Samverkan tänding, moment

Tändning och knack

Motor – Moment

Ytterligare detaljer om Motor

Jonströmmar