

TSFS09 – Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor – Fö 8

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

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

November 30, 2020

1/71

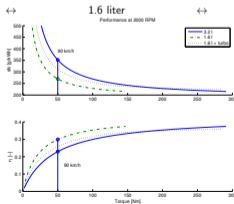
Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor – Knack
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

2/71

Nedskalning och överladdning

3.2 liter



1.6 liter turbo

3/71

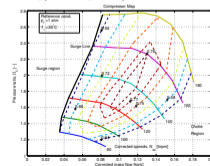
Kompressor och Turbin – Modell struktur

Generaliserad flödesmodell i MVEM

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

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

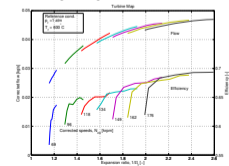
$$\dot{W} = f_3(\Pi, N_{corr}, p_{in}, T_{in})$$



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

Tryckkvot Π_c Expansionsförhållande $1/\Pi_c$.

Genomgång av implementation och användning. Viktigt!



4/71

The modeling & its implementation

Supplier data comes in corrected format.

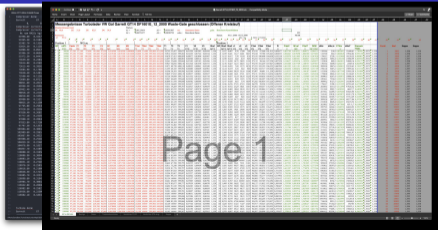
Build the flow & efficiency models in corrected variables

Do correction & decorrection when using the models.



5/71

Exempel på mappar



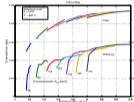
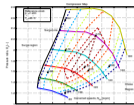
7/71

Beräkningsschema $[\dot{W}, \dot{m}, T_{low}] = f(P_{01}, P_{02}, T_{01}, N_c)$

- 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 $T_{low} = T_{02}$ 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 effekthalansen ger turbovarvtal.



6/71

Innehållsförteckning

- 1 Motor - Repetition
- 2 Övergripande Reglering
 - Repetition - Historik
 - Momentbaserad reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor - Knack
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

8/71

Motorreglering – Kort historik

På T-forden – Manuell reglering

- Handgas
- Tändningsinställning
- "Köra med slokande mustascher"

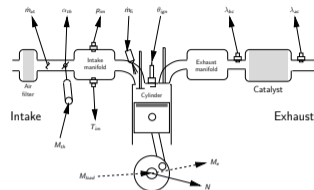
Senare (i Ford Mustang m.fl.)

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



Motorreglering - Sensorbaserad reglering

Första stegen i elektroniska EMS (Engine Management Systems)



10 / 71

Motorreglering - Mappbaserad reglering

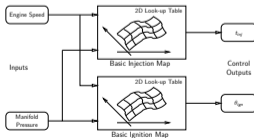
Illustration av hur mappar kan användas för att uppfylla de grundläggande reglerna för bränsle- och tändningsreglering.

Sensorvärden tas som insignaler.

N_e , p_{im}

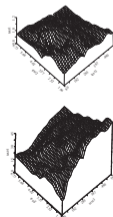
Målen uppnås via att man läser ut: injektoröppningstid t_{inj} och tändvinkel θ_{ign} från mappar i ett regelsystem.

Tankemodell: Mappen är en invers.



11 / 71

Engine control - Map based control



Fördel och möjlighet

Ett exempel med optimal luft/bränsle λ and tändningsvinkel α över en FTP cykel.

Mapbaserad reglering kan utvidgas och optimeras till mycket stor förfiningsgrad.

-Kalibrerarens Swiss Army Knife.

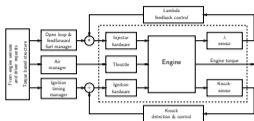
Datastrukturer och programvara för automatisk mappning.

Nackdel

Tidskrävande, kalibrera hela styrsystemet ≥ 15000 parametrar.

12 / 71

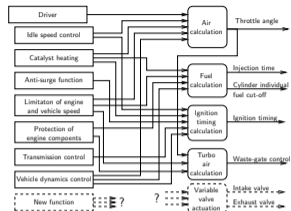
Motorreglering - De tre huvudlooparna



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

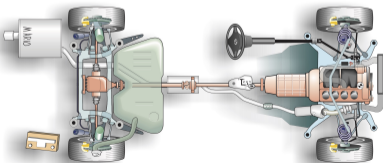
13 / 71

Styrsystemen blir mer och mer komplexa – Ohållbart



14 / 71

Momentbaserad reglering

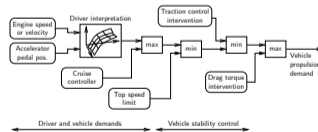


Vad vill föraren uppnå när han trampar på gasen?

- Tolka föraren, propagera tolkning från fordonsbeteende till motor.

15 / 71

Momentbaserad struktur – Fordon

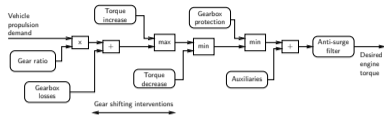


Från förare till hjulmoment

- Mycket arbete bakom förartolkning

16 / 71

Momentbaserad struktur – Drivlina

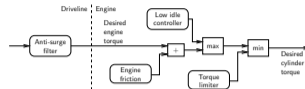


Från hjul till motor

- Anti-surge: Nästa projekt, drivlinereglering

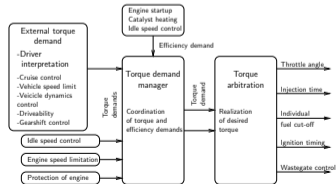
17 / 71

Momentbaserad struktur – Motor



18 / 71

Momentbaserad struktur – Översikt med aktuatorer



19 / 71

Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 **Momentreglering och Turbo**
 - Torque Model
 - Air Charge Control
 - Pressure Control
 - Cascade Control

- 4 Motor – Knack
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Inställningar

20 / 71

A Simple Torque Model

Relation between work and torque

$$W = \int M_c(\theta) d\theta = M 2 n_r \pi \Rightarrow M = \frac{W}{n_r 2 \pi}$$

Three component torque model

$$M = \frac{W_{ig} - W_{pump} - W_{fric}}{n_r 2 \pi}$$

Gross indicated work, W_{ig}

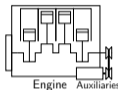
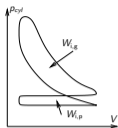
$$W_{ig} = m_f q_{LHV} \frac{1}{1 - r_c^{\gamma-1}} \eta_{ig} \eta_{\lambda} \eta_{ign}$$

Pumping work, W_{pump}

$$W_{pump} = V_d (p_{em} - p_{im})$$

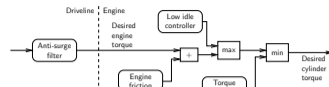
Friction work, W_{fric}

$$W_{fric} = V_d FMEP(N)$$



21 / 71

Engine Control Actuation



A torque model (cycle average) based on the work, $M = \frac{W}{4\pi}$

$$W = m_f q_{LHV} \frac{1}{1 - r_c^{\gamma-1}} \eta_{ig} \eta_{\lambda} \eta_{ign} - V_d (p_{em} - p_{im}) - V_d FMEP$$

Several ways to determine (or approximating) the control inputs

- In diesel engines: solve for m_f
- In SI (and turbo) engines – next slide

22 / 71

Engine Control Actuation

Controlling the cylinder air charge

$$W = m_f q_{LHV} \frac{1}{1 - r_c^{\gamma-1}} \eta_{ig} \eta_{\lambda} \eta_{ign} - V_d (p_{em} - p_{im}) - V_d FMEP \quad (1)$$

- Air mass to the cylinder

$$m_f = \frac{m_a}{\lambda (A/F)_s}$$

- Coupling to the intake manifold pressure

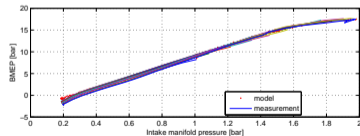
$$m_a = \eta_{vol} \frac{V_d p_{im}}{R T_{im}}$$

- Insert into (1) and solve for the pressure
Design pressure controller (see for example turbo control).

23 / 71

Engine Control Actuation

Experimental data for torque ($M = \frac{V_d}{4\pi} BMEP$) and manifold pressure



Simple affine model

$$BMEP(p_{im}) = -C_{p1} + C_{p2} p_{im}$$

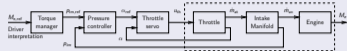
$C_{p1} = 3.5 \cdot 10^5$ and $C_{p2} = 12.5$ give a good fit to data.

24 / 71

Moment baserad reglering – Kaskadreglering

Tre regulatorer

- Två inre, återkopplade loopar, α , p_{im}
- En yttre, framkopplings loop, M



Varför är det ingen återkoppling i yttre loopen?

- Momentsensorn kostar pengar.
- Modellerna är tillräckligt bra och motiverar inte behovet.
- Finns yttre loopar (föraren, Cruise Controller).

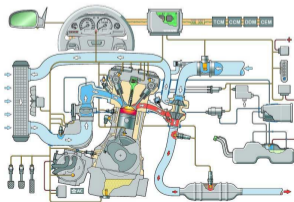
25 / 71

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 trotteln.
- Två aktuatorer: Wastegate resp. Trottel används.
- En extra frihetsgrad \Rightarrow kan optimera. **Prestanda – Bränsle**

26 / 71

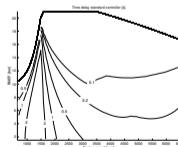
Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator



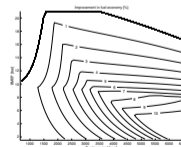
27 / 71

Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator

Förändring från tidsoptimal till bränsleoptimal
Extra svarstid



Vinst i bränsle

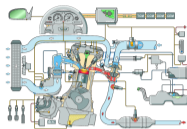


Detaljer i Eriksson et. al. (2002), "Control and Optimization of Turbocharged Spark Ignited Engines"

28 / 71

Trade-off – Ställ in acceptabel förlust över trottlet

- 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 i begränsningarna.
 - Ger problem med I-delen – Windup.
 - I projektet: Anti-Windup implementerat åt er. (Reklam för industriell reglerteknik)



Inspiration för Projektet

Utvärdera skillnaderna och vinsterna i projektet.

29 / 71

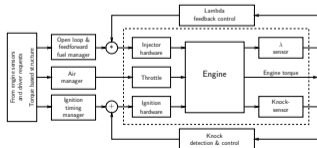
Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor – Knack
 - Oktantal
 - Oktantal & Knack
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

30 / 71

Tändningsloopen

Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* (utsläpp), mellersta styr momentet (körbarhet) och den nedersta är *tändningsregulatorn* (effektivitet).



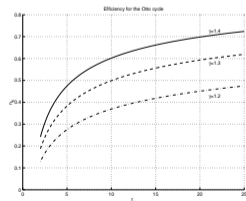
31 / 71

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 $r_c = \infty$?



32 / 71

En kolv som upplevt kraftigt knock



33 / 71

Andra kolvar som upplevt kraftigt knock



Knack kan förstöra motorn!!!

- Effektiviteten ökar med r_c ! Så gör också risken för knock!
- Måste hantera knock i motorstyrningen om vi vill utnyttja potentialen.
- Historiskt, hade man konservativ kalibrering (motorskydd) nu har alla återkoppling. -10% förbättrad effektivitet med återkopplad reglering.

34 / 71

Knack – En fundamental begränsning för bensinmotorn

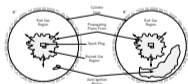
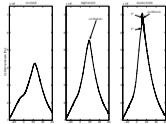


Illustration av processen och mätning.

Knack och oktantal är relaterade.



Oktantal – Bränslets förmåga att "motstå knock".

Hur kan man detektera knock?

- Söka efter signal med rätt frekvenser
- Cylinderns egenfrekvens 5-10 kHz

35 / 71

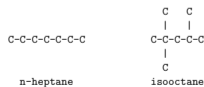
Knack – Oktantal

Bränslets oktantal:

Motstånd mot självantändning, höga kompressioner.

Definierar referensbränslen:

- n-heptan ON=0. Lång rak molekyl
- iso-oktan ON=100. Kort kompakt molekyl.



Hur bestäms oktantalet?

Standardmotor och procedur, 1928

Motor med variabel kompression (CFR Engine)
Bränsle att testa + 2 referensbränslen

1. Kör motor i referenspunkt N , p_{im} , T_{im} . Använd testbränsle
2. Skruva upp kompressionen så det knackar.
3. Växla till referensbränslen.
4. Blanda dem så blandningen knackar lika.
5. Notera blandningens sammansättning.

Om blandningen har 90% iso-oktan och 10% n-heptan så är oktantalet 90.

36 / 71

- 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

37 / 71

Litet mer om varför kompressionen är begränsad?

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

- Knack, vet vi redan om.
- Begränsning på maxtrycket, dimensionering av cylinder, topplock, kolv, vevstake.
- Värmeöverföring $dQ \neq 0$ sänker effektiviteten, bensinmotor $r_c \lesssim 16$ ($\lambda = 1$).
- Ökade emissioner.

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

39 / 71

Arbetspunkter för ON bestämning

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

Hur bestämmer man $ON > 100$?

Referensbränsle: iso-oktan + blyadditiv , $T = \frac{T \text{ milliliter } (C_7H_8)_4Pb}{1 \text{ gallon iso-octane}}$

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

38 / 71

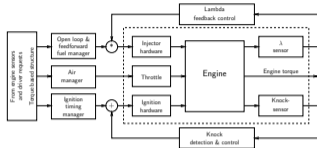
Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor – Knack
- 5 Tändningsreglering
 - Samverkan tändning, moment
 - Tändning och knack
 - Motor – Moment
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

40 / 71

Tändningsloopen

Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* (utsläpp), mellersta styr momentet (körbarhet) och den nedersta är *tändningsregulatorn* (effektivitet).



41 / 71

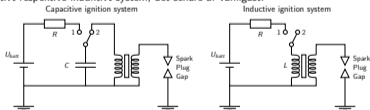
Tändningsreglering

- 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 knock borta.
Kalibrering \longleftrightarrow Slutent loop reglering.
- Tändtidpunkt
 - Tändenergi

42 / 71

Tändningsreglering – Hårdvara

Kapacitivt respektive induktivt system, det senare är vanligast.

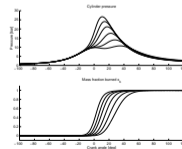


- När man kopplar 1 \rightarrow 2 så slår gnistan. – Detta ska hända vid θ_{ign} .
- Börjar ladda upp energi vid 2 \rightarrow 1.
- Startar uppladdningen tiden t_{dwell} innan.
- Laddningstiden t_{dwell} styr energin.

43 / 71

Tändningstidpunkt \longleftrightarrow Cylindertryck och MFB

Positionerar förbränningen relativt kolvrörelsen och styr pV-diagrammet
Sex cylindertryck i arbetspunkten 2000 rpm 50 Nm.

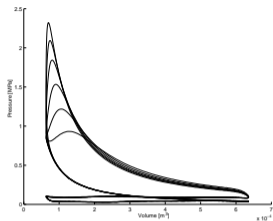


Var finns tändtidpunkten?

Var finns PPP och $x_0 = 0.5$?

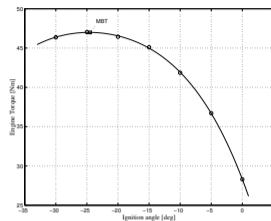
44 / 71

Tändningstidpunkt \longleftrightarrow pV-diagram



45 / 71

Bränsleförbrukning-Moment, Tändningstidpunkt och MBT

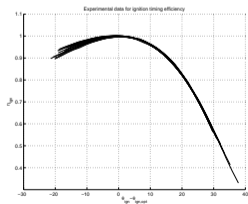


46 / 71

Tändkrokar – "Ignition Fish Hooks"

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

Avvikelse från optimum ($=0$).



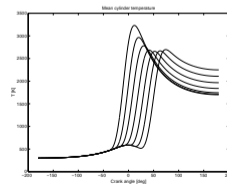
47 / 71

Tändtidpunktens betydelse för emissionerna

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.

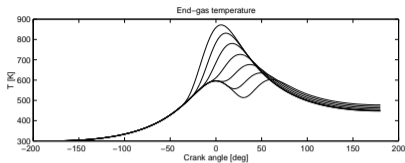
Höga maxtemperaturer medför att mer NO_x bildas.

Tidig tändning ger också högre tryck (mekanisk påfrestning) och HC utsläpp.



48 / 71

Knackrisk som funktion av tändtidpunkt

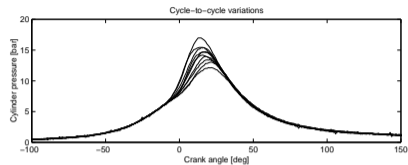


Ändgastemperaturen för olika tändtidpunkter.
Senare tändtidpunkt ger lägre temperaturer.
Grunden för återkopplad knackreglering.

49 / 71

Cykel till cykel variationer

Alla styrvariabler konstanta, lambda reglering urkopplad.
10 konsekutiva cykler

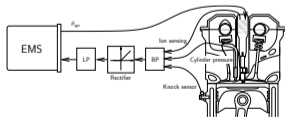


En cykel med snabb förbränning är mer benägen att knacka.

50 / 71

Knackdetektering – Hårdvara

Bandpassfiltrera signalen – Likrikta (eller kvadrera) – Integrera

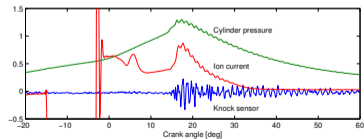


Tidsfönster i vevaxeldomänen och mät energiinnehållet E_i för cykel i .

51 / 71

Knackdetektering – Signalerna

Tre signaler med ringning i frekvensbandet för cylinderns egenmod.



52 / 71

Knackreglering – Söka sig mot knockgränsen

Vid detektion (*fara*) flytta snabbt bort (*retard*), gå sedan tillbaka mot gränsen (*advance*).

if ($E_i > \text{limit}$)

$\alpha = \alpha + K_{ret}$

else

$\alpha = \min(\alpha - K_{adv}, 0)$

end

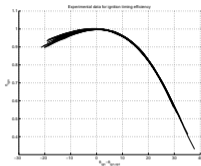
$\theta_{ign} = \theta_{ff} + \alpha$

K_{ret} - stor för snabbt skydd

K_{adv} - liten för att gå sakta mot gränsen

Regulatorjustering: sannolikheten för knock

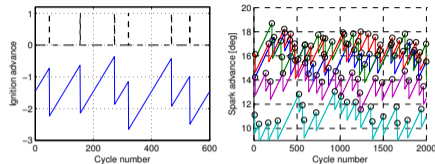
$$P(\text{knock}) = \frac{K_{adv}}{K_{ret} + K_{adv}}$$



53 / 71

Knackreglering – Söka sig mot knockgränsen

Illustration av knack reglering med justering K_{ret} nedåt K_{adv} uppåt.



54 / 71

Knackreglering

Knackreglering kompenserar för inverkan av parametervariationer.

- Omgivningstemperatur
- Omgivningstryck vid olika höjder
- Oktantal för olika bränslen
- Motorens tillverkningsstolerans och åldring

Kompressionsförhållandet kan ökas med 1 enhet.

Återkopplad reglering, jämfört med konservativ kalibrering:

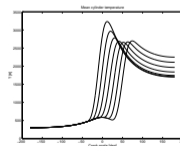
Bränsleförbrukningen reduceras med omkring 7%.

För turboladdade motorer är vinsterna större.

55 / 71

Tändtidpunktens betydelse för avgastemperaturen

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.



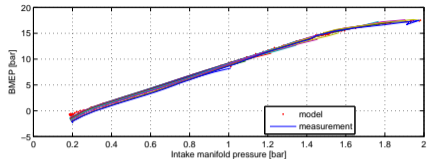
Sen tändning ger högre avgastemperatur.

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

–Kallstart, värma katalysator med sen tändning.

56 / 71

Motormoment och insugstryck



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

Affin modell enkel och god approximation.

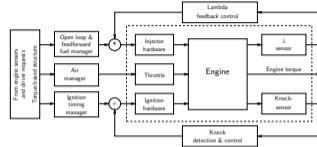
Vid höga laster:

-Kompromissar på tändningen (sänker effektiviteten) för att skydda motorn mot knock.

57 / 71

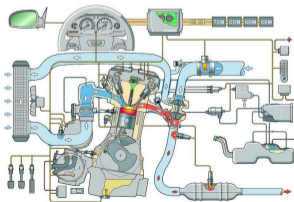
Huvudlooparna – Tändning

Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* (utsläpp), mellersta styr momentet (körbarhet) och den nedersta är *tändningsregulatorn* (effektivitet).



58 / 71

Samtidig tändning och turbostryck – APC



59 / 71

Momentstyrning med tändning

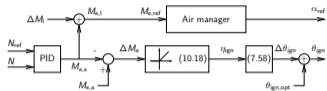
Tändningen är en snabb aktuator för moment.

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

60 / 71

Tomgångsreglering med stöd från tändningen

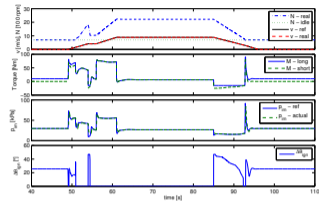
Två aktuatorer för momentet: luft och tändning.



63 / 71

Tomgångsreglering med stöd från tändningen

Första delen av NEDC, tomgångsreglering aktiv.



62 / 71

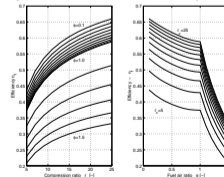
Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor – Knack
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

63 / 71

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

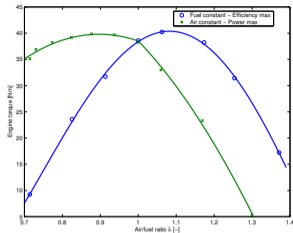
η ökar när ϕ minskar

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

"Fullständig" förbränning

64 / 71

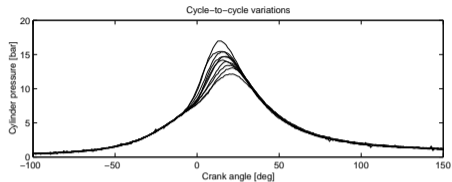
λ -svep – Mätningar på en Ottomotor



65 / 71

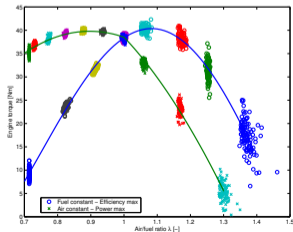
Cykel till cykel variationer

Alla styrvariabler konstanta, lambda reglering urkopplad.
10 konsekutiva cykler



66 / 71

Minst variation runt $\lambda = 0.9$



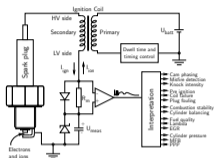
67 / 71

Innehållsförteckning

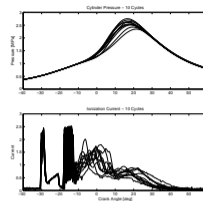
- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
- 4 Motor – Knock
- 5 Tändningsreglering
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

68 / 71

Använd tändstiftet när det inte används för tändning



69 / 71



Direkt mätning i cylindern. Återkoppling från förbränningen.

70 / 71

Innehållsförteckning

- 1 Motor – Repetition
- 2 Övergripande Reglering
 - Repetition - Historik
 - Momentbaserad reglering
- 3 Momentreglering och Turbo
 - Torque Model
 - Air Charge Control
 - Pressure Control
 - Cascade Control
- 4 Motor – Knack
 - Oktantal
 - Oktantal & Knack
- 5 Tändningsreglering
 - Samverkan tändning, moment
 - Tändning och knack
 - Motor – Moment
- 6 Ytterligare detaljer om Motor
- 7 Jonströmmar

71 / 71