

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

Fö 5 – Lambda reglering, Emissioner, Bonus om Lambda

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

November 2, 2020

1/83

## Innehållsförteckning

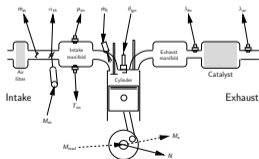
- 1 Repetition
  - Modellvalidering
  - Termodynamik
  - Reglering – Reglermål
  - (A/F) reglering
- 2 Bränslereglring
- 3 Emissioner
- 4 Mer om lambda regulatorn
- 5 Other Control Loops

2/83

## Luft och bränsle → Arbete och emissioner

### Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



3/83

## 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

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

Tryckuppbyggnad i insugsröret

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

4/83

## Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

$$\dot{m}_{cat} = C_3 \sqrt{\frac{\rho_{em} \Delta p}{R T_{em}}}, \quad \Delta p = p_{em} - p_{amb}$$

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  $T_{em}$

### Tankesätt

- Titta på ekvationerna och fundera på alla variabler ni ser, vad är de för typ?
- Hur skall man få värden på alla variabler. Signaler/parametrar/konstanter?

5 / 53

## Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

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

Bränslefilm

$$\frac{dm_{fc}}{dt} = X \dot{m}_E - \frac{1}{\tau_{fc}} m_{fc}$$

$$\dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_E + \frac{1}{\tau_{fc}} m_{fc}$$

$\lambda$  till motor

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

Gasblandning & Transportfördröjning

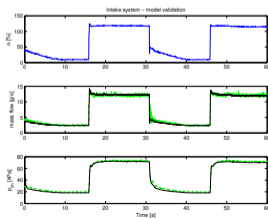
$$\frac{d}{dt} \lambda_{exh}(t) = \frac{1}{\tau_{mix}} (\lambda(t - \tau_d(N)) - \lambda_{exh}(t))$$

Sensordynamik

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

6 / 53

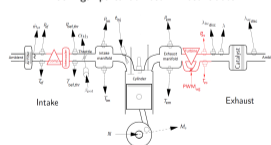
## Insugsrör – Modellvalidering



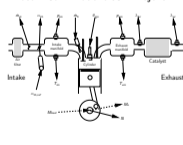
7 / 53

## Modellering och beräkningar av modellparametrar

Mätningar på turbomotor i motorlabbet.



Motorn som modelleras i Projekt 1.



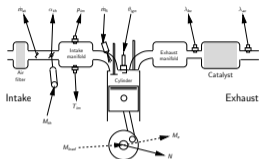
### Virtuell Motor - Tänk komponentmodellering

- Vilka mätningar behövs för att modellera komponenten?
- Hur är komponenten inkopplad vid mätningen? (katalysator  $p_{in} = p_{es}$ )
- Hur kopplas komponenten in i motorn? (katalysator  $p_{in} = p_{em}$ )

8 / 53

## Luft och bränsle → Arbete och emissioner

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



9 / 63

## Repetition Termodynamik

### Isentropisk betyder

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

### Viktigaste ekvationen + ideal gas

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

$$p_2 v_2^\gamma = p_1 v_1^\gamma \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

### Frigjord energi från bränslet

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

### Isokor process (konstant volym)

- Konstant volym  $dV = 0$
- Integrera 1:a huvudsatsen

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

### Isobar process (konstant tryck)

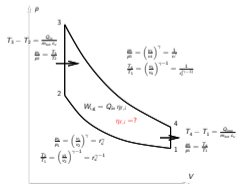
- Konstant tryck  $dp = 0$
- Entalpi definitionen + 1:a huvudsatsen

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

10 / 63

## Cykelräkning – $p_1$ och $T_1$ givna

Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



11 / 63

## Cykeleffektiviteter – huvudresultaten från cykelräkningar

### Ottocykel konstant-volymförbränning

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

Dieselykel eller cykel med konstant-trycksförbränning

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

Seilgercykel eller cykel med begränsat-tryck

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

12 / 63

## En Momentmodell som har en Struktur från Fysiken

Relation mellan arbete och moment

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

Trekomponentsmodellen för momentet

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

Indikerat bruttoarbete,  $W_{ig}$

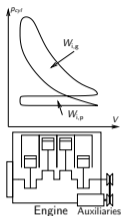
$$W_{ig} = m_V q_{LHV} \min(1, \lambda) \frac{1}{1 - \epsilon_c^{1-\lambda}} \eta_{ig,cb} \eta_{ig}$$

Pumparbete,  $W_{pump}$

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

Friktionsarbete,  $W_{fric}$

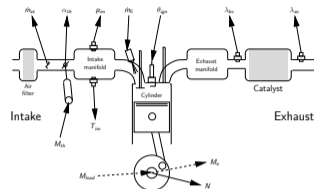
$$W_{fric} = V_d FMEP(N)$$



13/63

## Emissioner före och efter katalysatorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.

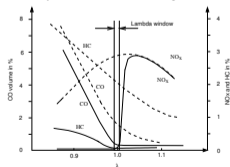


14/63

## Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn

heldragen - efter katalysatorn



Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering - ger reglsmål  $\lambda = 1$   
Regulatorn behöver både framkoppling och återkoppling.

15/63

## PI reglering av $\lambda$

Framkopplingen (nödvändig) beräknar ett nominellt bränsleflöde (använder fyllnadsgraden)

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

Återkopplingen justerar gissningen med en multiplikation

$$\dot{m}_{fc,d} = \dot{m}_{fc,n} F_{fc} = \dot{m}_{fc,n} (1 + \Delta_{fc})$$

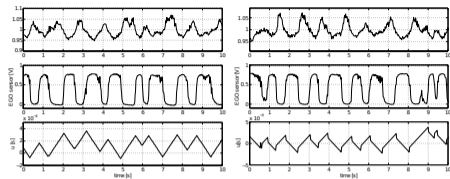
Multiplikationen centreras runt 1.

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



16/63

## Experiment med återkopplad reglering i motorlabbet

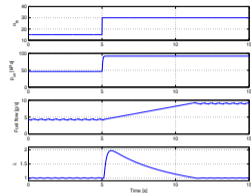


Känner igen huvuddragen från förra föreläsningen.  
Tuning av PI regulatorn kan göras bättre.

17 / 63

## Varför räcker det inte med återkoppling?

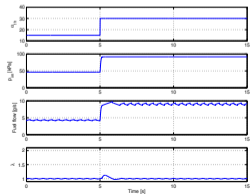
Diskret sensor, tidsfördröjning, och hårda begränsningar på  $\lambda$  stationärt begränsar förstärkningen.



18 / 63

## Med framkoppling i $\lambda$ -regulatorn

Reglering med framkoppling  
(ingen kompensering för bränslefilmen)



19 / 63

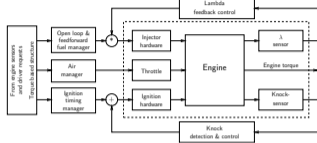
## Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Bränslereglern
  - Lambda reglering
  - Bränslefilmskompensering
- 3 Emissioner
- 4 Mer om lambda regulatorn
- 5 Other Control Loops

20 / 63

## Fokus på $\lambda$ -reglering – Transienter

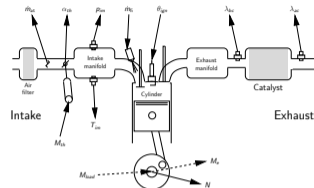
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* (utsläpp), mellersta styr momentet (körbarhet) och den nedersta är *tändningsregulatorn* (effektivitet).



21/63

## Kompensering för bränslefilm och injektor

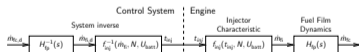
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



22/63

## Framkoppling – Bränslefilm och injektor

Grundprincip – Systeminvertering (statisk, dynamisk)



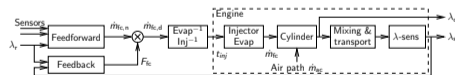
Om bränslefilmen är ett LTI-system, så kan  $H_{fp}(s)$  användas

$$\begin{cases} \frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \\ \dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \end{cases} \Leftrightarrow \dot{m}_{fc} = \underbrace{\left[ (1 - X) + \frac{X}{s \tau_{fp} + 1} \right]}_{H_{fp}(s)} \dot{m}_{fi}$$

om  $X$  och  $\tau_{fp}$  beror på arbetspunkten  $\Rightarrow$  använd observatör

23/63

## $\lambda$ -reglering – Projektet

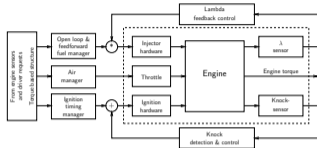


- Fram- och återkoppling i samverkan
- Direktsprutad motor: ingen bränslepölsdynamik

24/63

## Luft/bränsle regleringsloop – Återkoppling + framkoppling

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



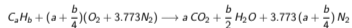
25/63

## Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Bränslereglering
- 3 Emissioner
  - Lagstiftning och Testcykler
- 4 Mer om lambda regulatorn
- 5 Other Control Loops

26/63

## Emissioner



- 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  $NO$ ,  $NO_2$ , ...

27/63

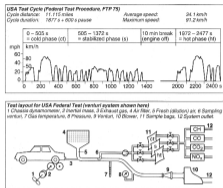
## Emissioner – Lagstiftning

- 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

28/63

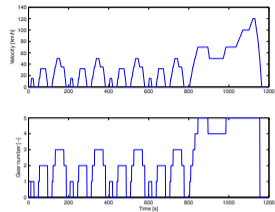
## US federal test procedure FTP 75 (Tre faser)

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



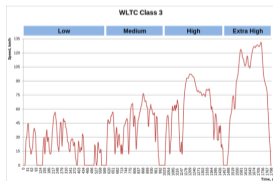
29 / 63

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



30 / 63

## Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)



31 / 63

## Framtiden

Spöket som skrämmar alla fordonstillverkare just nu...

**RDE** – Real Driving Emissions

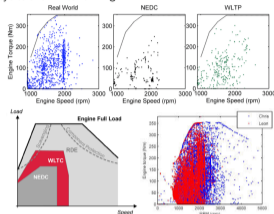
Myndigheterna kör en bil på väg. Enligt vissa procedurer...

32 / 63



## Engine operation in testing

Map coverage in cycles and in real driving.



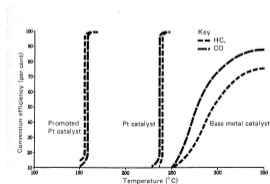
33 / 63

## Emissionsgränser, bensindriven personbil, USA (g/mile)

year	CO g/mile	HC g/mile	NO <sub>x</sub> 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	
...	...	...	...	

34 / 63

## Katalysator effektivitet och temperatur



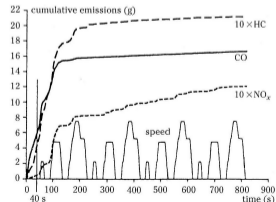
Vid start  $T \approx 20^\circ \text{C}$ .



Gaserna efterbehandlas inte.

35 / 63

## Emissioner under en europeisk körcykel

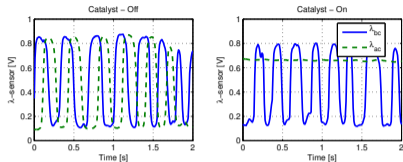


Enkel medelvärdesmodell: Light-off tid.

36 / 63

## Hur ser man om katalysatorn funkar eller inte?

$\lambda$ -sensorer före och efter.



Till projektet gör kallstart och mät Light-off tid.

37 / 63

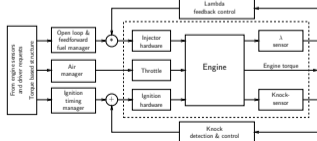
## Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Bränselreglering
- 3 Emissioner
- 4 Mer om lambda regulatorn
  - Feedforward Control – More Details
  - Model Based Control
- 5 Other Control Loops

38 / 63

## Mer om reglerlooparna – Återkoppling

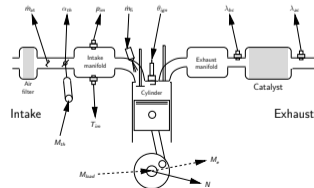
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* (utsläpp), mellersta styr momentet (körbarhet) och den nedersta är *tändningsregulatorn* (effektivitet).



39 / 63

## Dubbel sensor $\lambda$ -reglerin – Katalysator reglering

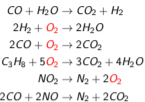
Två sensorer krävs för katalysator diagnos.



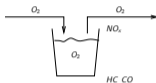
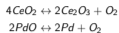
40 / 63

## Catalysatorn använder och lagrar Syre – Buffert Reglering

Emissions renande reaktioner.



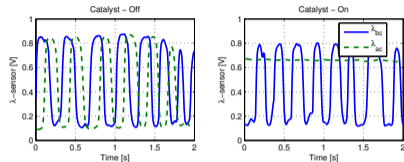
Syrelagrande reaktioner.



41/53

## Syrelaring i Katalysatorn.

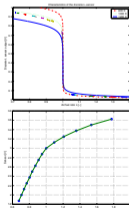
- Pre- and post-katalysator sensorer.
- Vänster – Katalysator kall (ingen funktion).
- Höger – Katalysator varm (fungerar).



Notera att spänningen ut från sensorn efter katalysatorn är > 0.6V, potential för justering. 42/53

## Reglering med Två Sensorer

- Dubbla sensorer, 2 möjligheter.
  - Diskret före, diskret efter.
  - Kontinuerlig före, diskret efter.
- Varför inte kontinuerlig efter?
  - Åldring av sensorn
  - Offset, elektriska störningar
  - Temperatur beroende
  - Stringenta krav på  $\lambda = 1$
  - Diskret växlingspunkt =
  - Precis mätning av  $\lambda = 1$



43/53

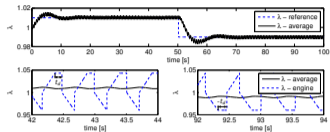
## Control methodologies

- Cascade control, method depends on sensor configuration
  - Disc-Disc:
    - Delayed switching in the inner loop
  - Cont-Disc:
    - Changing the offset
    - Level control
- Model based control:
  - Control oriented models for catalysts difficult, active research field

44/53

## Delayed switching – Example

When relay sensor switches, hold the control output.



45 / 53

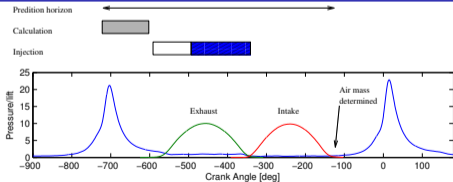
## Feedforward control

Challenges:

- Timing requirement
  - Timing diagram
  - Timing requirement
  - Prediction requirement
- Signal processing
  - Filtering requirements, alias, pumping noise.
  - Phase lag.
- Ad-hoc methods
- Model based methods
  - Observer
  - Prediction (simulation)

46 / 53

## Timing diagram – Requirement

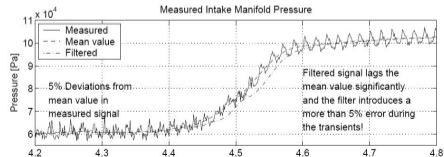


- Timing is crucial – No time delay
- Prediction is necessary

47 / 53

## Filtering requirement

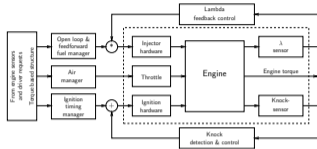
Filtering adds a time lag



48 / 53

## Model based $\lambda$ -control

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



40/63

## Model based control

Use the model for an observer that:

- estimates the states
- predicts the system behavior

System:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}$$

Observer:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) \end{cases}$$

50/63

## Model based control – An example

Model:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{m}}{dt} = \frac{RT_s}{V_s}(\hat{m}_{in}(\alpha, \rho_a, \rho_{im}, T_s) - \hat{m}_{ac}(N, \rho_{im}, T_{im})) & \text{States} \\ \frac{d\hat{m}_{ip,c}}{dt} = X\hat{m}_i - \frac{1}{\tau_p}\hat{m}_{ip} \\ \hat{m}_{ac} = \frac{\rho_{im}}{\sqrt{RT_s}} Q_{in}(\alpha) \Psi\left(\frac{\hat{m}_{ac}}{\rho_{im}}\right) & \text{Measured outputs} \\ \hat{\rho}_{im} = \hat{\rho}_{im} & \\ \hat{m}_{ac} = \eta_{vol}(N, \hat{\rho}_{im}) \frac{V_s N \hat{\rho}_{im}}{\hat{\rho}_{im} R T_{im}} & \text{Non-measured outputs} \\ \hat{m}_{ip,c} = \frac{1}{\tau_p}\hat{m}_{ip} & \end{cases}$$

Observer:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\rho}}{dt} = \frac{RT_s}{V_s}(\hat{m}_{in} - \hat{m}_{ac}) + K_{11}(\hat{m}_{ac} - \hat{m}_{ac}) + K_{12}(\hat{\rho}_{im} - \hat{\rho}_{im}) \\ \frac{d\hat{m}_{ip,c}}{dt} = X\hat{m}_i - \frac{1}{\tau_p}\hat{m}_{ip} + K_{21}(\hat{m}_{ac} - \hat{m}_{ac}) + K_{22}(\hat{\rho}_{im} - \hat{\rho}_{im}) \\ \hat{m}_{ac} = \frac{\hat{\rho}_{im}}{\sqrt{RT_s}} Q_{in}(\alpha) \Psi\left(\frac{\hat{m}_{ac}}{\hat{\rho}_{im}}\right) \\ \hat{\rho}_{im} = \hat{\rho}_{im} \\ \hat{m}_{ac} = \eta_{vol}(N, \hat{\rho}_{im}) \frac{V_s N \hat{\rho}_{im}}{\hat{\rho}_{im} R T_{im}} \\ \hat{m}_{ip,c} = \frac{1}{\tau_p}\hat{m}_{ip} \end{cases}$$

51/63

## Model based control – Prediction

General idea

- Start with state  $\hat{\rho}_{im}, \hat{m}_{ip}$ .
- Simulate the system over the prediction horizon, using guessed future inputs
  - Actuator constant
  - Can add actuator model
- Use new state and outputs from the model for the controller

52/63

## Model based control – Control action

Use the observer/predictor output to:

–calculate the desired fuel mass flow

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

–invert the fuel film dynamics and

$$\dot{m}_{fi} = \frac{1}{1-X} (\dot{m}_{fc} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp}) = \frac{1}{1-X} (\dot{m}_{fc} - \dot{m}_{fp,c})$$

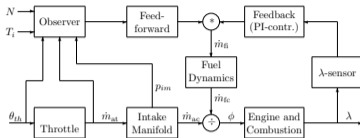
–invert injector characteristic

$$t_{inj} = \frac{\dot{m}_{fi}}{N c_1} + t_0(u_{batt})$$

53/63

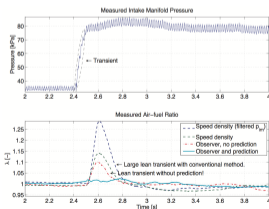
## Modellbaserad reglering – Detta exempel som blockschema

Flera modeller används för att beräkna framkopplingens utsignal och kombineras med återkoppling för att garantera  $\lambda = 1$ .



54/63

## Modellbaserad reglering – Resultat



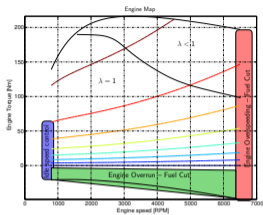
55/63

## Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Bränsleregering
- 3 Emissioner
- 4 Mer om lambda regulatorn
- 5 Other Control Loops
  - Strategy Map
  - EGR Control
  - Purge control

56/63

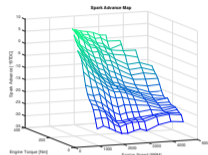
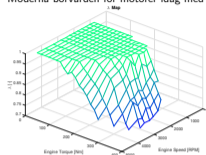
## Control strategies



57 / 63

## Regler strategier

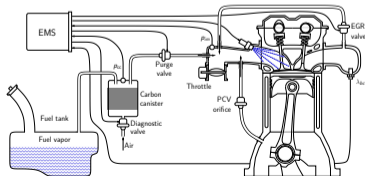
Moderna bôrvâden fôr motorer idag med TWC.



58 / 63

## Other systems

Other systems influence the air fuel ratio calculations



59 / 63

## EGR control (Exhaust Gas Recirculation)

- Why:** Reduce  $NO_x$ .  
Better part load  $p_{im}$ -increases.  
Lower the knock tendencies at high load (cooled EGR).
- What:** Dilute unburned gases with burned.
- How:** Open a valve between intake and exhaust.  
Shut of at idle and full load.
- Challenges:** Consequences for the  $\lambda$ -controller.  
How can the amount of EGR be determined?  
There is an upper limit on the dilution level.  
There are not yet sufficiently good models.  
Soot and particles clogs the pipes.

Open loop, calibration. ↔ Feedback control.

60 / 63

**Why:** Evaporative HC emissions.

**What:** Empties carbon canister of fuel.

**How:** Opens the valve into the intake system.

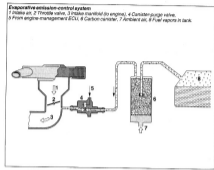
**Challenges:** Maintain  $\lambda = 1$  and driveability at valve opening.

1% volymflöde med HC  $\Rightarrow$   $\sim 20\%$  i  $\lambda$ .

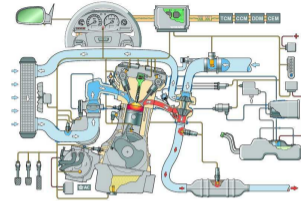
– Binary control valve (difficult).

– Continuous valve (easier).

Shut off at idle and full load.



61 / 63



62 / 63

- 1 Repetition
  - Modellvalidering
  - Termodynamik
  - Reglering – Reglermål
  - (A/F) reglering
- 2 Bränslerreglering
  - Lambda reglering
  - Bränslefilmskompensering
- 3 Emissioner
  - Lagstiftning och Testcykler
- 4 Mer om lambda regulatorn
  - Feedforward Control – More Details
  - Model Based Control
- 5 Other Control Loops
  - Strategy Map
  - EGR Control
  - Purge control

63 / 63