

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

September 12, 2019

Innehållsförteckning

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

Bränslereglring

Emissioner

Mer om lambda regulatorn

Other Control Loops

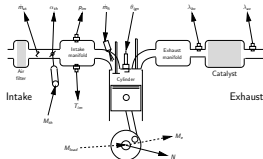
1 / 62

2 / 62

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



3 / 62

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

$$\dot{m}_{21}(\alpha, p_{amb}, T_{amb}, \Pi) = \frac{p_{amb}}{\sqrt{RT_{amb}}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(\Pi)$$

Luftflöde in i cylindern

$$\dot{m}_{2c}(N, p_{im}, T_{im}) = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d n_{cyl} N}{R T_{im} n_i}$$

Tryckkuppenbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} \frac{dm_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} (\dot{m}_{21} - \dot{m}_{2c})$$

4 / 62

Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

$$\dot{m}_{cat} = C_3 \sqrt{\frac{\rho_{em} \Delta p}{R T_{em}}}$$

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 ...

5 / 62

Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

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

Bränslefilm

$$\begin{aligned} \frac{dm_{fb}}{dt} &= X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_p} m_{fb} \\ \dot{m}_{fc} &= (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_p} m_{fb} \end{aligned}$$

Bränsleinjektor - Direkt inspr.

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

λ till motor

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

Gasblandning & Transportfördrojning

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

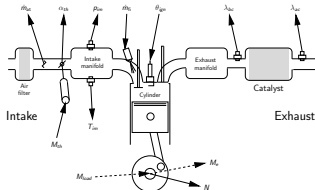
Sensordynamik

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

6 / 62

Emissioner före och efter katalysatorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.

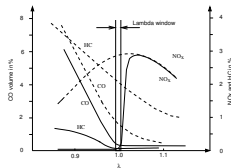


7 / 62

Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn

heldragen - efter katalysatorn



Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering

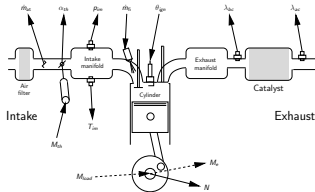
8 / 62

λ-reglering ($\lambda = 1 \pm 0.03$)

- ▶ Hårt krav och modellösäkerheter \Rightarrow **Återkoppling** nödvändig.
 - ▶ Stationärt $\lambda = 1$:
 - ▶ Återkoppling 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 reläsensör

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



9 / 62

10 / 62

PI reglering av λ

Framkopplingen beräknar ett nominellt bränsleflöde

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

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.

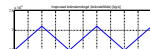
$$F_{fc} = (1 + \Delta_{fc}) \quad \text{with} \quad \Delta_{fc} = K_I \int e_\lambda dt$$



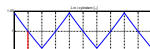
Integrerande regulator



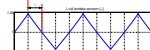
$\lambda_{sond}(t)$



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



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



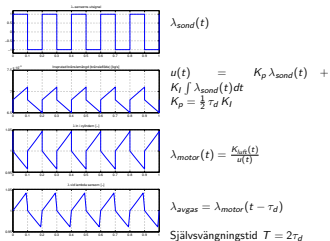
$\lambda_{vgas} = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$

Självsvängningstid $T = 4\tau_d$

11 / 62

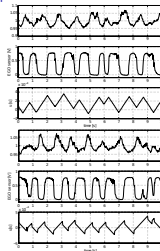
12 / 62

PI regulator



13 / 62

Experiment i motorlabbet

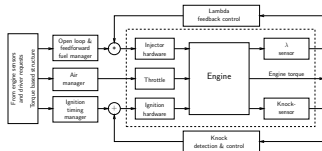


Känner igen huvuddragen
Tuning av PI regulatorm kan göras bättre.

14 / 62

Framkoppling för λ -reglering – Transienter

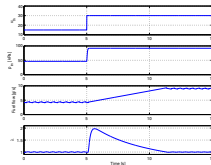
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



15 / 62

Varför är inte återkoppling tillräckligt?

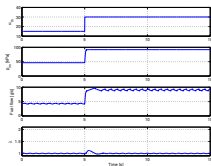
Relänsensor, tidsfördröjning, hårda krav på lambda stationärt begränsar förstärkningen.



16 / 62

λ-reglering – Framkopplingsloopen

Reglering med framkoppling
(ingen bränslefilmskompensering)



17 / 62

Grundinsprutning & Framkopplingsloopen i λ-regulatorn

Mass air flow principle (CFI):

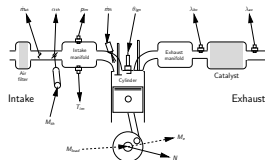
Kan mäta \dot{m}_{at}

Speed density principle (PFI):

Använd η_{vol} och mät p_{im} , N , T_{im}

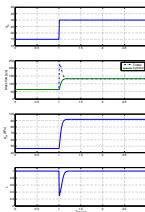
$$\dot{m}_{fc,n} = \frac{\dot{m}_{at}}{(A/F)_s \lambda}$$

$$\dot{m}_{fc,n} = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d N}{R T_{im} n_{im}} \cdot \frac{1}{(A/F)_s \lambda}$$



18 / 62

λ-Reglering – Transient



Kan inte mäta \dot{m}_{ac}

Mass air flow principle:

Kan mäta \dot{m}_{at}

Problem pga ej rätt flöde (se fig)

Speed density principle:

Utnyttja η_{vol} och mät p_{im} , N samt T_{im} .

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

Viktiga praktiska aspekter:

Svarstid i trycksensor, filtrering, prediktering.

19 / 62

Innehållsförteckning

Repetition

Bränslereglring

Bränslefilmskompensering

Emissioner

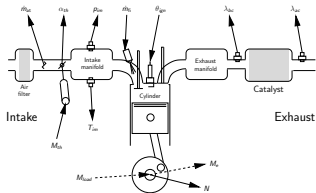
Mer om lambda regulatorn

Other Control Loops

20 / 62

Kompensering för bränslefilm och injektor

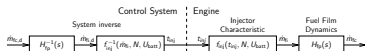
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



21/62

Framkoppling – Bränslefilm och injektor

Grundprincip – Systeminvertering (statisk, dynamisk)



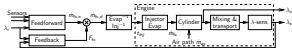
Om bränslefilmen är ett LTI-system, så kan $H_{fp}(s)$ användas

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

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

22/62

λ -reglering – Projektet

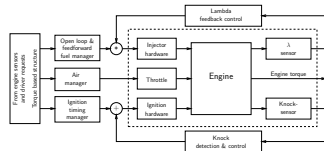


- Fram- och återkoppling i samverkan
- Direktinsprutad motor: ingen bränslepölsdynamik

23/62

Luft/bränsle regleringsloop – Återkoppling + framkoppling

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



24/62

Innehållsförteckning

Repetition

Bränslereglering

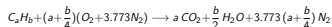
Emissioner

Lagstiftning och Testcykler

Mer om lambda regulatorn

Other Control Loops

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 , ...

25 / 62

26 / 62

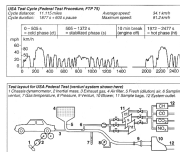
Emissioner – Lagstiftning

- ▶ 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

27 / 62

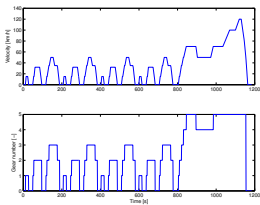
US federal test procedure FTP 75 (Tre faser)

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

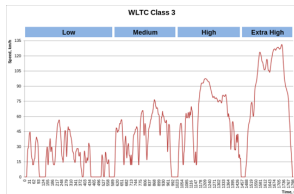


28 / 62

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



Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)



29 / 62

30 / 62

Framtiden

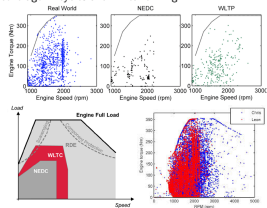
Spöket som skrämmar alla fordonstillverkare just nu...

RDE – Real Driving Emissions

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

Engine operation in testing

Map coverage in cycles and in real driving.



31 / 62

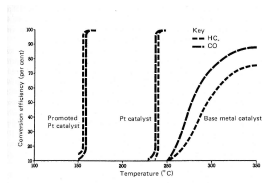
32 / 62

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	
:	:	:	:	

33 / 62

Katalysator effektivitet och temperatur



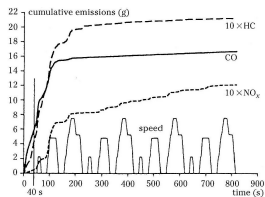
Vid start $T \approx 20^\circ \text{C}$.

⇒

Gaserna efterbehandlas inte.

34 / 62

Emissioner under en europeisk körcykel

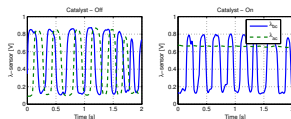


Enkel medelvärdesmodell: Light-off tid.

35 / 62

Hur ser man om katalysatorn funkar eller inte?

λ -sensorer före och efter.



Till projektet gör kallstart och mät Light-off tid.

36 / 62

Innehållsförteckning

Repetition

Bränslereglering

Emissioner

Mer om lambda regulatorn

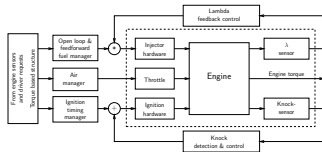
Feedforward Control – More Details

Model Based Control

Other Control Loops

Mer om reglerlooparna – Återkoppling

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

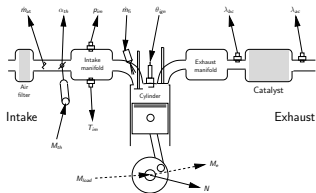


37 / 62

38 / 62

Dubbel sensor λ -reglerin – Katalysator reglering

Två sensorer krävs för katalysator diagnos.

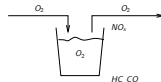
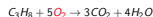


39 / 62

Katalysatorn använder och lagrar Syre – Buffert Reglering

Emissions renande reaktioner.

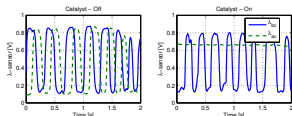
Syrelagrande reaktioner.



40 / 62

Syrelering i Katalysatorn.

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

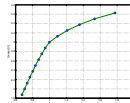
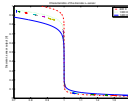


Notera att spänningen ut från sensorn efter katalysatorn är $> 0.6V$, potential för justering.

41 / 62

Dual Sensor Control

- ▶ Dual sensor control, 2 options.
 - ▶ Discrete before, discrete after.
 - ▶ Continuous before, discrete after.
 - ▶ Why not continuous after?
 - ▶ Aging of the sensor
 - ▶ Offset, electrical disturbances
 - ▶ Temperature dependence
 - ▶ Stringent requirements on $\lambda = 1$
- Discrete switch point = Precise measurement of $\lambda = 1$



42 / 62

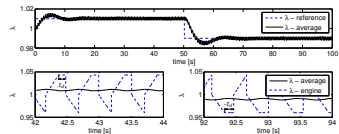
Control methodologies

- ▶ 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

43 / 62

Delayed switching – Example

When relay sensor switches, hold the control output.



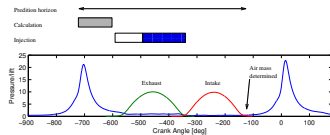
44 / 62

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)

Timing diagram – Requirement



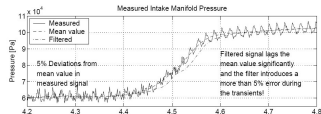
- ▶ Timing is crucial – No time delay
- ▶ Prediction is necessary

45 / 62

46 / 62

Filtering requirement

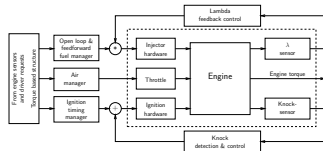
Filtering adds a time lag



47 / 62

Model based λ -control

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



48 / 62

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:

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

Model based control – An example

Model:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\rho}_m}{dt} = \frac{R T}{V} (\hat{m}_{st}(\alpha, \hat{\rho}_m, \hat{\rho}_m, T_a) - \hat{m}_{ac}(N, \hat{\rho}_m, T_m)) & \text{States} \\ \frac{d\hat{m}_{fp}}{dt} = X \hat{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} & \\ \hat{m}_{st} = \frac{R}{\sqrt{R T_a}} Q_{st}(\alpha) \Psi\left(\frac{\hat{\rho}_m}{\rho_s}\right) & \text{Measured outputs} \\ \hat{\rho}_m = \hat{\rho}_m & \\ \hat{m}_{ac} = \eta_{act}(N, \hat{\rho}_m) \frac{V_a N \hat{\rho}_m}{\delta \delta m, R T_m} & \text{Non-measured outputs} \\ \hat{m}_{fp,c} = \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} & \end{cases}$$

Observer:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\rho}_m}{dt} = \frac{R T}{V} (\hat{m}_{st} - \hat{m}_{ac}) + K_{11}(\hat{m}_{st} - \hat{m}_{st}) + K_{12}(\hat{\rho}_m - \hat{\rho}_m) \\ \frac{d\hat{m}_{fp}}{dt} = X \hat{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} + K_{21}(\hat{m}_{st} - \hat{m}_{st}) + K_{22}(\hat{\rho}_m - \hat{\rho}_m) \\ \hat{m}_{st} = \frac{R}{\sqrt{R T_a}} Q_{st}(\alpha) \Psi\left(\frac{\hat{\rho}_m}{\rho_s}\right) \\ \hat{\rho}_m = \hat{\rho}_m \\ \hat{m}_{ac} = \eta_{act}(N, \hat{\rho}_m) \frac{V_a N \hat{\rho}_m}{\delta \delta m, R T_m} \\ \hat{m}_{fp,c} = \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} \end{cases}$$

49 / 62

50 / 62

Model based control – Prediction

General idea

- Start with state $\hat{\rho}_m, \hat{m}_{fp}$.
- 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

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

$$\hat{m}_{fi} = \frac{1}{1-X} \left(\hat{m}_{fc} - \frac{1}{\tau_{fp}} \hat{m}_{fp} \right) = \frac{1}{1-X} (\hat{m}_{fc} - \hat{m}_{fp,c})$$

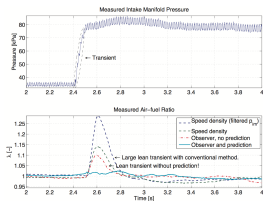
–invert injector characteristic

$$t_{inj} = \frac{\hat{m}_{fi}}{N c_{1s}} + t_0(u_{batt})$$

51 / 62

52 / 62

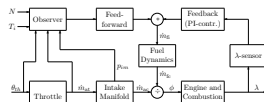
Model based control – Result



53 / 62

Model based control – This example

The model is used to calculate the feedforward control action



54 / 62

Innehållsförteckning

Repetition

Bränslereglring

Emissioner

Mer om lambda regulatorn

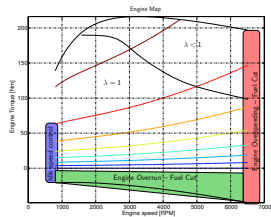
Other Control Loops

Strategy Map

EGR Control

Purge control

Control strategies

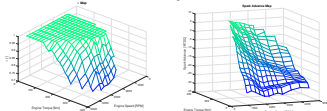


55 / 62

56 / 62

Regler strategier

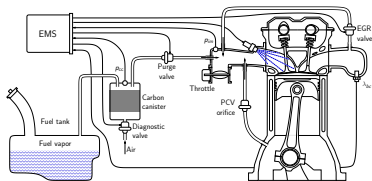
Moderna brvarden fr motorer idag med TWC.



57 / 62

Other systems

Other systems influence the air fuel ratio calculations



58 / 62

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 λ -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. \leftrightarrow Feedback control.

59 / 62

Fuel control

Why: Evaporative HC emissions.
What: Empties carbon canister of fuel.

How: Opens the valve into the intake system.

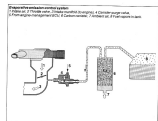
Challenges: Maintain $\lambda = 1$ and driveability at valve opening.

1% volumflde med HC \Rightarrow \sim 20% i λ .

–Binary control valve (difficult).

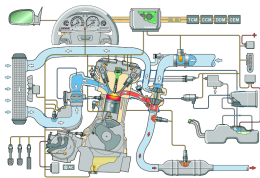
–Continuous valve (easier).

Shut off at idle and full load.



60 / 62

More Controllers



Repetition

MVEM

Reglering – Reglermål

(A/F) reglering

Lambda reglering

Bränslereglring

Bränslefilmskompensering

Emissioner

Lagstiftning och Testcykler

Mer om lambda regulatorn

Feedforward Control – More Details

Model Based Control

Other Control Loops

Strategy Map

EGR Control

Purge control