

# TSFS09 – Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor – Fö 11

## Drivlina – Reglering

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

December 4, 2019

2 / 47

## Innehållsförteckning

Drivlinmodellering – Repetition  
Summering av modellerna

Drivlina reglering

Drivlinereglering – Allmänna kommentarer

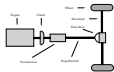
Reglersyntes

Drivlinereglering – Hastighetsreglering

Drivlinereglering - Moment

3 / 47

## Drivlinmodellering



Olika modeller av olika komplexitetsgrad.

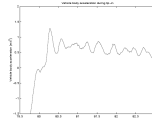
- ▶ Stel drivlina - Körcyclsimulering, acceleration
- ▶ Flexibel drivlina - Reglerdesign för "körbarhet"
  - Linjäriserad modell - analys, linjär observatörs- och reglerdesign
  - Olinjär modell: Validering, reglerdesign, ...
- ▶ Flexibilitet/glapp i kopplingen - Reglerdesign och validering
- ▶ Sensordynamik

–Vad skall modellen användas till?

4 / 47

## Drivlina - Modellering

Dynamiska effekter i drivlinan.



Exempel:

- Slag och såg. Shunt and shuffle. Klonk.
- Projekt 3: Säg/Shuffle/Jerk.

5 / 47

## Drivlina - Modellering

### Modell

$$\begin{aligned}(J_m + J_r/i_t^2 + J_r/i_t^2)\ddot{\theta}_m &= M_m - M_{fr,m} - (b_r/i_t^2 + b_r/i_t^2)\dot{\theta}_m \\ &\quad - k(\theta_m/i_t i_r - \theta_w)/i_t i_r \\ &\quad - c(\dot{\theta}_m/i_t i_r - \dot{\theta}_w)/i_t i_r \\ (J_w + m r_w^2)\ddot{\theta}_w &= k(\theta_m/i_t i_r - \theta_w) + c(\dot{\theta}_m/i_t i_r - \dot{\theta}_w) \\ &\quad - (b_w + m c_r^2)\dot{\theta}_w - \frac{1}{2}c_w A_d \rho_a^3 \dot{\theta}_w^2 \\ &\quad - r_w m (c_1 + g \sin(\alpha))\end{aligned}$$

### Tillstånd

$$x_1 = \theta_m/i_t i_r - \theta_w, \quad x_2 = \dot{\theta}_m, \quad x_3 = \dot{\theta}_w$$

## Drivlina - Reglering

### Mätsignal

$$y = Cx + e$$

### Olika sensorer

$$C_m = (0 \ 1 \ 0)$$

$$C_w = (0 \ 0 \ 1)$$

### Prestanda variabel z

$$z = Mx + Du$$

6 / 47

7 / 47

## Innehållsförteckning

Drivlinemodellering – Repetition

Drivlina reglering

Drivlinereglering – Allmänna kommentarer

Motiverande exempel

Tillståndsform

Överföringsfunktioner

Rotort – Motiverande exempel med P-regulator

Reglersyntes

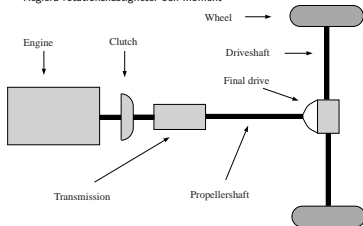
Drivlinereglering – Hastighetsreglering

Drivlinereglering - Moment

8 / 47

## Drivlina - Reglering

Reglera rotationshastigheter och moment



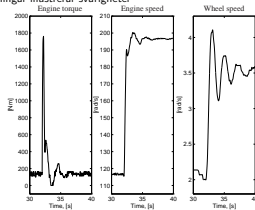
9 / 47

### Viktiga tillämpningar

- ▶ driveline speed control (farthållning)
- ▶ driveline control for gear shifting ("automatväxling" med motorstyrning)
- ▶ driveline control for driveability in transients (drivline reglering for körbarhet i transienter)

## Varför är det inte enkelt?

–Mätningar illustrerar svårigheter



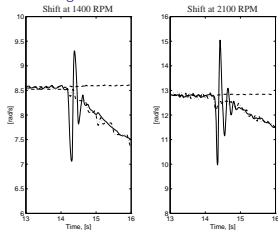
Stegsvar  $t=32$  s:

motorvarvtal-dämpat, hjulvarvtal-svängigt

10 / 47

11 / 47

## En annan mätning



Från växelläge till neutralläge

12 / 47

## Olika typer av modeller

- ▶ Tillståndsform - implementera i Simulink
- ▶ Överföringsfunktion - finna insikt om reglerproblemet

Insignal:

$$u = M_m - M_{fr,m}$$

Tillstånd:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\theta_m - \theta_w \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_w \end{bmatrix}$$

Utsignaler

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_w \\ \theta_e \\ M_d \end{bmatrix}$$

13 / 47

## Modellen på tillståndsform

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{I} & -1 \\ -\frac{\alpha k}{I} & -\frac{\alpha c}{I} & \frac{\alpha c}{I} \\ \beta k & \frac{\beta c}{I} & -\beta(c + \gamma) \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad \text{där} \quad \begin{cases} \alpha = \frac{1}{J_w + m r_d^2} \\ \beta = \frac{1}{r} \end{cases}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ k & \frac{c}{I} & -c \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

Förluster:

- $c$  - Dämpning i fjädern.
- $\gamma$  - Den förenklade fordonmodellen (luft- & rullmotstånd).

Transformation från tillståndsform till överföringsfunktion

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$$

14 / 47

## Överföringsfunktioner

$$\begin{bmatrix} G_{u,\hat{\theta}_w}(s) \\ G_{u,\hat{\theta}_m}(s) \\ G_{u,M_d}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i\alpha\beta c(s+\frac{c}{I})}{n(s)} \\ \frac{\beta\alpha(s^2+s\beta(c+\gamma)+k\beta)}{n(s)} \\ \frac{\alpha c(s+\frac{c}{I})(s+\beta\gamma)}{n(s)} \end{bmatrix}$$

$$n(s) = (k + c s)\alpha(s + \beta\gamma) + i^2 s(s^2 + k\beta + s\beta(c + \gamma))$$

- Nämnarpolynomiet är svårt att faktorisera
- Förenkla modellen litet.

15 / 47

## Förenkling – Förlustfritt system

Förlustfritt system  $\gamma = 0$  och  $c = 0$  ger insikt i strukturen

$$\begin{bmatrix} G_{u,\hat{\theta}_w}(s) \\ G_{u,\hat{\theta}_m}(s) \\ G_{u,M_d}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha\beta k}{I} \frac{1}{s(s^2+k(\frac{\beta}{I}+\beta))} \\ \alpha \frac{s^2+k\beta}{s(s^2+k(\frac{\beta}{I}+\beta))} \\ \frac{\alpha k}{I} \frac{1}{s^2+k(\frac{\beta}{I}+\beta)} \end{bmatrix}$$

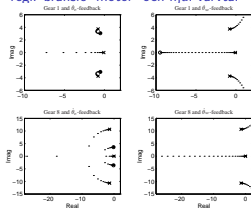
Komplexa poler i  $\pm j\sqrt{k(\beta + \frac{\alpha}{I})}$

Nollställen för  $G_{u,\hat{\theta}_m}(s)$  i  $\pm j\sqrt{k\beta}$  (innanför polerna)

- Låg växel ger stort utväxlingsförhållande  $i$ .
- Reglerdesign med P-regulator
  - Rotort för det förenklade systemet.
  - Rotort för det dämpade systemet.

16 / 47

## Rotort, P-regl. bränsle motor- och hjulvarvtal



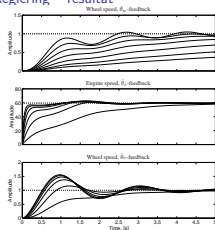
över - växel 1, under - växel 8.

Kryss öppna systemets poler.

P-reglering av hjulvarvtalet kan ge instabilt system.

17 / 47

## P-Reglering – resultat



Stegsvar för system reglerade med P-regulator olika återkopplings signaler.

18 / 47

## Innehållsförteckning

Drivlinemodellering – Repetition

Drivlina reglering

Drivlinereglering – Allmänna kommentarer

**Reglersyntes**

Drivlinereglering – Hastighetsreglering

Drivlinereglering - Moment

19 / 47

## Drivlina - Modellering

Motoregenskaper som är viktiga i ett verkligt fall

**Maxmomentbegränsning** Motorns utmoment är begränsat.

**Rökbegränsare** Om turbostrycket är lågt och högt moment är begärt så blir momentet begränsat för att undvika rök.

**Överföringsfunktion från begärt till verkställt moment**

**Motorfriktion** I momentbegäran behöver man även ta hänsyn till motorfriktionen – kall och varm motor, varvtalsberoende, etc. Automatiskt i den momentbaserade arkitekturen.

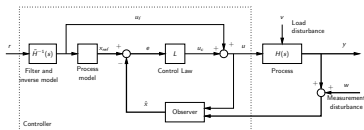
## Litet om reglersyntes

- ▶ Tillståndsrekonstruktion (observatör)
- ▶ Begränsad styrsignal
- ▶ Återkoppling från rekonstruerade tillstånd
- ▶ Framkoppling från störning (känd transient)

20 / 47

21 / 47

## Modellbaserad Reglering



22 / 47

## Innehållsförteckning

Drivlinemodellering – Repetition

Drivlina reglering

Drivlinereglering – Allmänna kommentarer

Reglersyntes

**Drivlinereglering – Hastighetsreglering**

Tillståndsåterkoppling

Aktiv dämpning

Stationärt fel

Experiment

Drivlinereglering – Moment

23 / 47

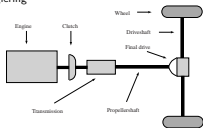
## Drivlina - Reglering

Reglera rotationshastigheter och moment

Tillämpningar:

-hastighetsreglering

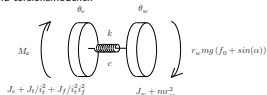
-växlingsreglering



24 / 47

## Drivlina - Reglering

Använd torsionsmodellen



25 / 47

## Drivlina - Reglering

Hur var det nu man gjorde mer avancerad reglering än P-reglering?

Tillståndsåterkoppling

$$u = l_0 r - K_c \hat{x} \quad (1)$$

$K_c$  är tillståndsåterkopplingsmatrisen

Q: -Men hela tillståndet  $x$  mäts inte...

A: -Rekonstruera tillståndet  $\hat{x}$  med en observatör.

Observatör – Kalman-filter

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - C\hat{x}) \quad (2)$$

$K_f$  är Kalmanförstärkningsmatrisen.

26 / 47

## Drivlina - Reglering

Repetition av Reglerteknik

- ▶ Man kan placera polerna
- ▶ Placera polerna så att dynamiken blir väl dämpad
- ▶ Regulatorn sköter då detta

Aktiv dämpning

27 / 47

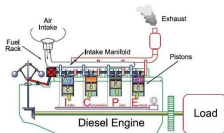
## Drivlina - Reglering

Fungerar Aktiv dämpning?

I så fall: Hur?

Jämför med klassisk RQV

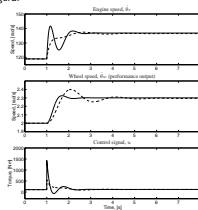
$$u = u_0 + K_p(r_1 - \dot{\theta}_m) \quad (3)$$



28 / 47

## Drivlina - Reglering

Ja, det fungerar

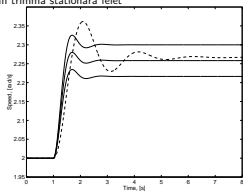


Jämförelse vid ungefär samma snabbhet.

29 / 47

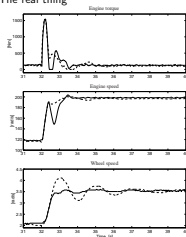
## Drivlina - Reglering

Man kan trimma stationära felet



Stationära felet skilt från noll kan vara viktigt för körkänsla.  
-Fordon i uppförbacke.

## Fältförsök – The real thing



Aktiv dämpning (heldragen) – Traditional RQV (streckad).

30 / 47

31 / 47

## Innehållsförteckning

Drivlinemodellering – Repetition

Drivlina reglering

Drivlinereglering – Allmänna kommentarer

Reglersyntes

Drivlinereglering – Hastighetsreglering

Drivlinereglering - Moment

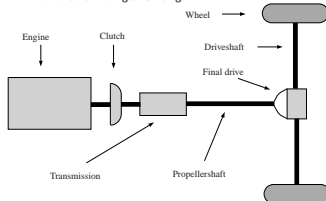
Växlingsförlopp

Avslutande kommentarer

## Drivlina - Reglering

Reglera moment

Driveline control for gear shifting



32 / 47

33 / 47



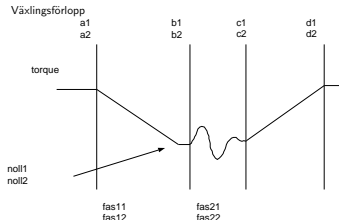
## Automatic Gear Shifting in Heavy Trucks

**Automatic transmission** This approach is seldom used for the heaviest trucks, due to expensive transmissions and problems with short life time. Another drawback is the efficiency loss compared to manual transmissions.

**Manual transmission and automatic clutch** A quite common approach, which needs an automatic clutch system. This system has to be made robust against clutch wear.

**Gear shifting by engine control** With this approach the automatic clutch is replaced by engine control, realizing a virtual clutch. The only addition needed to a standard manual transmission is an actuator to move the gear lever. Lower cost and higher efficiency characterize this solution.

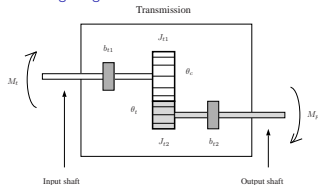
## Drivlina - Reglering



34 / 47

35 / 47

## Drivlina - Reglering



Simplified model of the transmission with two cogwheels with conversion ratio  $i_t$ . The torque transmitted between the cogwheels is the transmission torque,  $z$ .

–Jämför "Enkelt exempel"

## Drivlina - Reglering

Control Criterion

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T z^2 + \eta(u - u_{shift})^2 \quad (4)$$

Utskrivet

$$\begin{aligned} & \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T z^2 + \eta(u - u_{shift}(\dot{\theta}_w, l))^2 \quad (5) \\ & = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (Mx + Du)^2 + \eta(u - \mu_x \dot{\theta}_w - \mu_l l)^2 \end{aligned}$$

Vad betyder de två termerna?

36 / 47

37 / 47

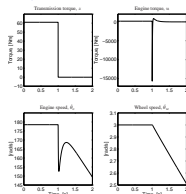
## Drivlina - Reglering

Vad betyder första termen?  
Unconstrained Active Damping

$$u = -D^{-1}Mx \quad (6)$$

$z = 0$  is guaranteed.

## Drivlina - Reglering



"Unconstrained active damping."

Oscillationerna dämpas med orealistisk styrsignal. Hastigheten minskar.

38 / 47

39 / 47

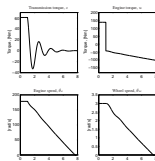
## Drivlina - Reglering

Vad betyder andra termen?  $(u - u_{shift})^2$   
Gear-Shift Condition

$$u = u_{shift} \quad (7)$$

$z = 0$  ur stelkroppsantagande

## Drivlina - Reglering



Control the gear-shift condition.

Styrsignalen får ned momentet men oscillationer i drivlinan. Måste vänta.

40 / 47

41 / 47

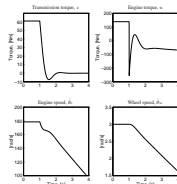
## Drivlina - Reglering

Kombinationen

$$\begin{aligned} & \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T z^2 + \eta(u - u_{\text{shift}}(\hat{\theta}_w, l))^2 \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (Mx + Du)^2 + \eta(u - \mu_x \hat{\theta}_w - \mu_l l)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Hur väljer man  $\eta$ ?

## Drivlina - Reglering

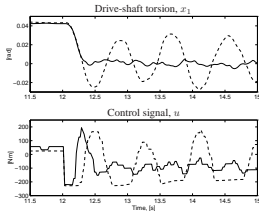


Transmission-torque controller, solving the gear-shift criterion.  
Uppnåbar styrsignal, och aktiv dämpning av oscillationerna.

42 / 47

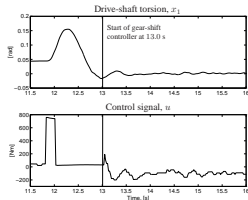
43 / 47

## Verifiering - I



Fältförsök med aktiv dämpning.

## Verifiering - II



Fältförsök – Exciterar dynamiken och kopplar sedan in regulatorn.  
Oscillationerna dämpas ut.

44 / 47

45 / 47

Följetongen fortsätter

### Enkelt exempel

Illustrerar följande viktiga idéer:

- ▶ likhet mellan olika ut signaler
- ▶ skillnad mellan olika ut signaler
- ▶ förenklat principstudium av poler och nollställen
- ▶ momentmodellering
- ▶ möjliga förkortningar

Förstår ni nu denna figur?

