Tre laborationer i processidentifiering och adaptiv reglering

Johansson, Rolf

1987

CODEN: LUTFD2/(TFRT-3197)/1-52/(1987)

Tre laborationer i processidentifiering och adaptiv reglering

Rolf Johansson

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
Januari 1987

Department of Automatic Control
Lund Institute of Technology
P.O. Box 118
S-221 00 Lund Sweden

Document name
Report

Date of issue
January 1987

Document Number
CODEN: LUTFD2/(TFRT-3197)/1–52/(1987)

Supervisor

Sponsoring organisation

Author(s)
Rolf Johansson

Title and subtitle
Tre laborationer i processidentifiering och adaptiv reglering. (Tree laboratory exercises in process identification and adaptive control).

Abstract

Three laboratory exercises in process identification and adaptive control are described in this report. The exercises cover user aspects of recursive identification, self-tuning control and model reference adaptive control. The algorithm environment is transparent and highly interactive for good comprehension of algorithm features. The exercises have all been developed for various courses at the Department of Automatic Control.

Key words

Classification system and/or index terms (if any)

Supplementary bibliographical information

ISSN and key title

ISBN

Language
Swedish

Number of pages
52

Recipient's notes

Security classification

TRE LABORATIONER I

PROCESSIDENTIFIERING

OCH ADAPTIV REGLERING

Författare:

Rolf Johansson

Abstract

Three laboratory exercises in process identification and adaptive control are described in this report. The exercises cover user aspects of recursive identification, self-tuning control and model reference adaptive control. The algorithm environment is transparent and highly interactive for good comprehension of algorithm features. The exercises have all been developed for various courses at the Department of Automatic Control.

FÖRORD

Föreliggande arbete innehåller tre laborationer med växlande inslag av systemidentifiering och adaptiv reglering. Samtliga utnyttjar en regulatorimplementering baserad på IBM-AT med program skrivna i Modula-2, vilken beskrives detaljerat i Johansson, R. (1987): *Adaptor - A System for Process Identification and Adaptive Control – An Implementation Report*, Rapport 3190, Institutionen för Reglerteknik, LTH, Lund. Laborationerna har samtliga använts inom kurser på varierande nivåer inom grundutbildning, forskarutbildning och externkurser vid Institutionen för Reglerteknik, LTH.

Följande laborationer ingår:

— *Processidentifiering - Laboration 3: Rekursiv Identifiering och Adaptiv Reglering.*

  Denna laboration ingår i kursen Processidentifiering, som givits första gången under höstterminen 1987 såsom reguljär fortsättningskurs och forskarutbildningskurs vid Reglerteknik, LTH. Studenterna förutsättes ha goda förkunskaper i tidsdiskret reglerteori och stokastiska processer. Laborationen avser täcka det avsnitt av kursen, som berör realtidsidentifiering och rekursiva metoder. Mycket uppmärksamhet ägnas åt parameterskattningarnas noggrannhet och konvergenshastighet. Problem med identifiering i sluten reglerslinga demonstreras. Det nära släktskapet mellan rekursiv identifiering och adaptiv reglering påvisas i de senare, valfria delarna av laborationen.

— *Digital Reglering - Laboration 4: Identifiering och Adaptiv Reglering.*

  Denna laboration ingår i forsättningskursen *Digital Reglering (FED)*, som ges såsom första fortsättningskurs. Laborationen ingår såsom kursens fjärde och sista laboration efter föregående moment om tidsdiskreta signaler, interaktiva program, den allmänna linjära regulatorn och linjärkvadratisk optimering. Laborationen är försiktigt analytisk och har ambitionen att kort presentera den rekursiva identifieringens möjligheter.

— *Adaptiv Reglering - Laboration 2:*

  Denna laboration ingår såsom en laboration i en externkurs, som hittills (ht 87) givits fem gånger för yrkesverksamma ingenjörer. Laborationen ingår såsom delmoment för att beskriva egenskaper hos självinställande regulatorer och adaptiva modellreferenssystem. Framställningen har målsättningen att vara mera fenomenologiskt inriktad och förutsätter vidare aktiv handledning. Det går nämligen här inte att förutsätta, att kurseleverna har tillräckliga matematiska förkunskaper för någon mera analytisk förståelse av förloppen. Ambitionen är således, att experimentellt demonstrera den adaptiva regleringens möjligheter och begränsningar.

Den är min förhoppning, att dessa laborationer förmår ge sina utövare en försiktigt positiv attityd till ämnet utan överdrifter vare sig i form av nihilistisk kritik eller överdrivna anspråk.

Rolf Johansson

PROCESSIDENTIFIERING

LABORATION 3

REKURSIV IDENTIFIERING OCH ADAPTIV REGLERING

Författare:
Rolf Johansson

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola, Lund
Oktober 1987

1. INTRODUKTION

Denna laboration avser att belysa rekursiv identifiering av en enkel process, som kan beskrivas som ett dynamiskt system.

I den första uppgiften testas den rekursiva identifieringens egenskaper, när några av dess varianter prövas. Därefter skall ett systemet identifieras, samtidigt som en regulator är inkopplad. Vidare kommer ett experiment med regulatordimensionering baserad på de skattade parametrarna. Slutligen visas adaptiv reglering, där de skattade parametrarna direkt användes i regulatorn.

Rekvisita:

- Tankprocess
- IBM-PC AT
- Adaptor - Program för adaptiv reglering
- Börvärdespotentiometer

Tankprocessen utgöres av två seriekopplade tankar med fria utlopp, där man styr pumpen för inflödet till första tanken (grön kontakt) och mäter nivån i vardera tanken (röda kontakter). Laborationen skall genomföras med *Adaptor* - ett program, som implementerar en självinställande regulator på en IBM-PC AT processdator.

2. BESKRIVNING AV REGULATORPROGRAMMET

En kortfattad beskrivning av de skattnings- och regulatoralgoritmer, som används, ges nedan. Inga egentliga härledningar ges här. Den, som är intresserad av detaljer, hänvisas till att studera litteratur med avsnitt om rekursiv identifiering exempelvis Ljung, Söderström: *Theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press, 1984.

Regulatorprogrammet ADAPTOR innehåller ett antal olika algoritmer för identifiering med minstakvadrat-anpassning av ARMAX-modeller till mätdata. Det finns också rutiner för filtrering av de mätdata, som senare används i MK-anpassningen. Vidare finns det en algoritm för en allmän linjär regulator för tidsdiskret reglering. Detta möjliggör undersökningar av identifiering med slutna reglerslingor. Vidare kan man på detta sätt testa regulatorer, som framtages med enkla beräkningar baserade på de erhållna skattningarna.

Det finns vidare en adaptiv regulator för polplacering av en pol. En annan algoritm har dessutom givits den speciella egenskapen, att integralverkan obligatoriskt ingår. Det finns också indirekt (explicit) adaptiv reglering och en självinställande regulator ad modum Clark-Gawthrop.

Följande beteckningar används nedan:

u : Styrsignal

y : Mätsignal

u_c : Referensvärde

y_m :Referensmodellens utsignal

v : Mätbar störning; Framkopplingssignal

d : Stegformad störning; Lågfrekvent störning

ν : Störning

A Processens polpolynom
B Processens nollställespolynom
b_0 Förstärkning
k Processens tidfördröjning
R Regulatorpolynom m.a.p. u
S Regulatorpolynom m.a.p. y
T Regulatorpolynom m.a.p. u_c
Δ Differensbildning; $1 - q^{-1}$
A_0 Observatörspolynom $1 - tq^{-1}$
A_M Önskat polpolynom $1 - pq^{-1}$
θ Parametervektor
φ Regressionvektor
ε Prediktionsfel

Identifieringsalgoritmen

En kort beskrivning av algoritmen ges av följande uttryck.

Algoritm utan differensbildning

— Processmodell:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})v(t) + d$$
$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \ldots + a_{n_A}q^{-n_A}$$
$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \ldots + b_{nB}q^{-n_B}$$
$$C(q^{-1}) = c_0 + c_1q^{-1} + \ldots + c_{n_C}q^{-n_C}$$

— Regulatormodell:

$$R(q^{-1})u(t) = -S(q^{-1})y(t) + T(q^{-1})u_c(t) - V(q^{-1})v(t)$$
$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1q^{-1} + \ldots + r_{n_R}q^{-n_R}$$
$$S(q^{-1}) = s_0 + s_1q^{-1} + \ldots + s_{n_S}q^{-n_S}$$
$$T(q^{-1}) = t_0 + t_1q^{-1} + \ldots + t_{n_T}q^{-n_T}$$
$$V(q^{-1}) = v_0 + v_1q^{-1} + \ldots + v_{n_V}q^{-n_V}$$

— Slutna systemets polpolynom:

$$R(q^{-1})A(q^{-1}) + S(q^{-1})q^{-k}B(q^{-1})$$

— Datafiltrering:

$$y_f(t) = \left(\frac{F(1)}{F(q^{-1})}\right)(y(t) - y_0); \qquad u_f(t) = \left(\frac{F(1)}{F(q^{-1})}\right)(u(t) - u_0);$$
$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \ldots + f_{n_F}q^{-n_F}$$

— Parameterskattningsmodell:

$$y_f(t) = \Big(1 - A(q^{-1})\Big) y_f(t) + q^{-k} B(q^{-1}) u_f(t) + C(q^{-1}) v_f(t)$$

$$y_f(t) = \theta^T \varphi(t)$$

$$\theta = \begin{pmatrix} -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n_A} & b_0 & \cdots & b_{n_B} & c_0 & \cdots & c_{n_C} \end{pmatrix}^T$$

$$\varphi(t) = \begin{pmatrix} y_f(t-1) & \cdots & y_f(t-n_A) & u_f(t-k) & \cdots & v_f(t) & \cdots \end{pmatrix}^T$$

— Rekursiv minstakvadrat-metod:

$$\varepsilon(t) = y_f(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\widehat{\theta}(t) = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Algoritm med differensbildning

— Processmodell:

$$A(q^{-1})\Delta y(t) = q^{-k} B(q^{-1}) \Delta u(t) + C(q^{-1}) \Delta v(t)$$

— Regulatormodell:

$$R(q^{-1})u(t) = -S(q^{-1})y(t) + T(q^{-1})u_c(t) - V(q^{-1})v(t)$$

— Slutna systemets polpolynom:

$$R(q^{-1})A(q^{-1}) + S(q^{-1})q^{-k}B(q^{-1})$$

— Datafiltrering:

$$\Delta y_f(t) = \frac{F(1)\Delta}{F(q^{-1})} y(t); \qquad \Delta u_f(t) = \frac{F(1)\Delta}{F(q^{-1})} u(t); \qquad etc.$$

— Parameterskattningsmodell:

$$\Delta y_f(t) = (1 - A(q^{-1}))\Delta y_f(t) + B(q^{-1})\Delta u_f(t) + C(q^{-1})\Delta v_f(t)$$

$$\Delta y_f(t) = \theta^T \varphi(t)$$

$$\theta = \begin{pmatrix} -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n_A} & b_0 & b_1 & \cdots & b_{n_B} & c_0 & \cdots & c_{n_C} \end{pmatrix}^T$$

$$\varphi(t) = \begin{pmatrix} \Delta y_f(t-1) & \cdots & \Delta y_f(t-n_A) & \Delta u_f(t-k) & \cdots & \Delta v_f(t) & \cdots \end{pmatrix}^T$$

— Rekursiv minstakvadrat-metod:

$$\varepsilon(t) = \Delta y_f(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\widehat{\theta}(t) = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Handhavande

I programmet utnyttjas analoga in- och utgångar till IBM-PC/AT enligt följande:

AD 0: Referensvärde u_c

AD 1: Mätvärde y

AD 2: Framkopplingssignal v (mätbar störning)

DA 0: Styrsignal u

Programmet *Adaptor* startas på IBM-PC/AT med kommandot:

```
C:\use\ident>m2 adaptor
```

och svarar strax med en pil "→" Om man då besvarar denna med `INDIRE` och med att därefter att trycka på tangentbordets "return" så erhålles följande tablå med regulatorns status.

```
=========================================================
RECURSIVE LEAST SQUARES ESTIMATION
---------------------------------------------------------
Regulatormode: Stop
Estim = false       Diff = false      FF = false
Tsamp =   1.0000    Ulow =  0.0000    Uhigh = 1.0000

Regulator
 nR = 0      R =     1.0000
 nS = 0      S =     1.0000
 nT = 1      T =     0.0000    0.0000
 nV = -1      V =


Estimator
 nA = 1      A =     1.0000    0.0000
 nB = 0      B =     0.0000
 nC = -1      C =

 nF = 0      F =     1.0000
 k = 1       Lambda =     0.9900

---------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna i appendix. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1:

Betrakta följande kommandosekvens

```
->MANUAL
->nS 1
->S 2.0 1.0
```

```
->k 2
->TSAMP 3
->RUN
->ESTIM T
```

Denna kommandosekvens inleds med begäran om manuell reglering och fortsätter med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras k till två, varefter samplingsintervallet `TSAMP` sättes till 3 sekunder. Med kommandot `RUN` startas den digitala regulatorn, och med `ESTIM T` körs slutligen parameterskattningen igång.

3. IDENTIFIERING AV ÖVRE TANKENS DYNAMIK

Laborationen skall genomföras för undersökning av den övre tankens dynamik. Vi betraktar styrningen av pumpen som insignal och nivån i övre tanken såsom utsignal.

Med frekvensanalys har man för en av laborationsuppställningarna konstaterat att processen väl kan beskrivas av den tidskontinuerliga överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{0.05}{s+0.0148} = \frac{3.38}{1+s67.7}$$

kring vattennivån 10 cm i övre tanken. Observera att detta gäller för en av uppställningarna och att det kan finnas vissa variationer mellan de olika exemplaren. En tidsdiskret modell med samplingsintervallet h $[s]$ får då formen

$$y(t+h) = a_1 y(t) + b_0 u(t)$$

eller

$$y(t) = \frac{b_0}{q+a_1} u(t) = \frac{b_0 q^{-1}}{1+a_1 q^{-1}} u(t)$$

med

$$a_1 = -\exp(-ah) \qquad b_0 = \frac{b}{a}(1-\exp(-ah))$$

Här nedan följer en lista på den tidsdiskreta överföringsfunktionens koefficienter för några olika val av samplingstiden h.

Parameterskattningar med samplingsperiod h								
h	0.1	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0	100.0	300.0
$\hat{a}_1$	-0.999	-0.996	-0.985	-0.957	-0.863	-0.642	-0.228	-0.012
$\hat{b}_0$	50E-4	15E-3	0.050	0.147	0.465	1.21	2.61	3.34

Dessa värden kan tjäna som jämförelsematerial till de resultat, som vi kommer att erhålla.

Vid alla försök gäller att man skall genomföra "små" variationer av nivån kring 10 cm. Detta kan att göras med manuell reglering eller med hjälp av olika regulatorer. Olika varianter kommer att studeras.

Vid alla försök bör man också notera vilka parametrar, som används av regulatorn. Om man tillfälligt vill spara undan regulatorer eller parameterskattningar, så kan detta göras med kommandot `SAVE`. De sparade skattningarna med regulator återhämtas med kommandot `LOAD`.

Försök 1

Håll nivån vid 10 cm genom manuell reglering, som erhålles genom kommandot

```
->MANUAL
```

varefter börvärdesspaken justeras kring lämpligt värde. Invänta önskad stationär nivå.

1a. Genomför en rekursiv identifiering utan differensbildning och notera resultaten för några samplingsintervall i tabellen nedan.

```
->nA 1
->nB 0
->k 1
->diff F
->tsamp 10
->estim T
```

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

1b. Genomför en rekursiv identifiering utan differensbildning, men där jämviktsnivåerna subtraherats bort. Detta göres genom att invänta stationaritet vid önskad nivå, varefter kommandot EQUIL göres. Då inhämtas de stationära signalnivåerna till programmet. Notera resultaten för några samplingsintervall i tabellen nedan.

```
->equil
->diff F
->tsamp 10
->estim T
```

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

1c. Genomför samma experiment men med differensbildning (`diff T`) av regressorvariablerna u och y. Brusförstärkningen minskar, om vi dessutom väljer filtret F för regressorerna (jfr sid 4) som ett lågpassfilter.

```
->diff T
->nf 1
->f 1 -0.9
```

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

Försök 2

En regulator beskriver ett samband mellan in- och utsignaler. Detta samband gäller utöver de samband som processmodellen anger. Detta kan under vissa omständigheter ställa till problem vid identifiering. Vi skall därför undersöka, om vi får andra parameterskattningar, när vi samtidigt har en regulator inkopplad.

2a. Genomför nu samma experiment som i 1b men med en proportionalregulator, som håller nivån 10 cm. Välj exempelvis följande regulator.

```
->nR 0
->R 1
->nS 0
->S 5
->nT 0
->T 5
->run
->estim T
```

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$	$h = \dots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

2b. Försök som i 2a men med variation av referensvärdet.

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

2c. Försök som i 2a men med en litet sämre regulator enligt kommandosekvensen.

```
->nR 2
->R 1 -1.7 0.72
->nS 0
->S 1
->nT 0
->T 1
```

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

— Slutsatser:

Försök 3

Ett syfte med identifiering kan vara att utnyttja parameterskattningar för att beräkna och att dimensionera regulatorer. Låt processmodellen liksom tidigare vara

$$y(t+h) = -a_1 y(t) + b_0 u(t) + d$$

där d är en okänd störning, som tros variera långsamt. I detta försök skall vi beräkna en tidsdiskret PI-regulator

$$(1 - q^{-1})u(t) = -(s_0 + s_1 q^{-1})y(t) + t_0 u_c(t)$$

så att processen väl följer referensvärdet. Polplacering i origo kan ge den önskade följeverkan, samtidigt som integralverkan kompenserar för d. Eftersom en sådan dimensionering är tämligen känslig för parameterfel, så torde den kunna vara ett bra test på parameterskattningarnas kvalitet. Den önskade regulatorn fås exempelvis för parametervalen

$$s_0 = \frac{1}{b_0}(1 - a_1) \qquad s_1 = \frac{a_1}{b_0} \qquad t_0 = \frac{1}{b_0}$$

varvid det slutna systemet blir

$$y(t + h) = u_c(t) + (1 - q^{-1})d$$

Med nominella parametervärden enligt tabell sid 7 får man då med `TSAMP 10`

$$s_0 = 4.01 \qquad s_1 = -1.86 \qquad t_0 = 2.15$$

och med `TSAMP 3` erhålles i stället

$$s_0 = 13.31 \qquad s_1 = -6.51 \qquad t_0 = 6.80$$

3a. Testa om detta visar sig stämma för några olika av de parameterskattningar, som Du har förtroende för. Anteckna i de nedanstående tabeller de bästa processparametrarna och motsvarande regulatorparametrar.

Parameterskattningar med samplingsperiod h						
	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$
$\widehat{a}_1$						
$\widehat{b}_0$						

Beräknade regulatorparametrar för samplingsperiod h						
	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$
s_0						
s_1						
t_0						

— Slutsatser:

4. ADAPTIV REGLERING

Om man infogar en beräkningsrutin, som efter varje rekursion av parameterskattningen beräknar en ny regulatorinställning, så har man konstruerat en *adaptiv* regulator. I programmet kan detta begäras genom följande kommandosekvens, där en referensmodells poler anges jämte en observatör.

```
->tune t
->Am 1 0
->A0 1 -0.3
->run
```

— Slutsatser:

5. DIREKT ADAPTIV REGLERING

En version med s.k. direkt adaptiv reglering förevisas av handledaren. Begreppet *direkt adaptiv regulator* avser en beräkningsgång, där regulatorparametrarna kan identifieras direkt. Därvid slipper man en regulatorberäkning under varje samplingsintervall.

```
->stop
->direct
->nr 1
->r 1 0
->ns 1
->s 0 0
->estim t
->tune t
->run
```

En kortfattad beskrivning av de regulatoralgoritmer som används ges i ett appendix. Inga egentliga härledningar ges här.

Regulatorprogrammet *Adaptor* innehåller ett antal olika algoritmer för adaptiv reglering. En utav dessa utgöres av en adaptiv regulator för polplacering av en pol. En annan algoritm har dessutom givits den speciella egenskapen att integralverkan obligatoriskt ingår. Det också indirekt (explicit) adaptiv reglering och en självinställande regulator *ad modum* Clark-Gawthrop.

Försök

Det brukar rekommenderas i litteraturen att man vid försöken startar i stationärt tillstånd med nivån ungefär lika med börvärdet. Man genomför därefter "små" variationer av nivån kring 10 cm. Detta åstadkommes enklast genom manuell reglering. Detta är dock ej helt nödvändigt, och det kan vara instruktivt att även göra någon "kallstart". Notera genomgående vilka parametrar, som används av regulatorn.

EQUIL0	Jämviktsnivåer nollställes
AMP r	Amplitud för intern referensvärdeskälla läses in
PER r	Periodtid [s] för intern fyrkantvåg läses
MEAN r	Medelvärde för intern signalgenerator läses in
DELAY i	Intern fördröjning av styrsignal; Antal samplingsperioder
FILTER l	Lågpassfiltrering/Högpassfiltrering
EXTREF l	Referensvärde tages via AD-omvandlare 0
INTREF l	Internt referensvärde slages till/från

där

r	reellt tal t.ex. 0.99
i	heltal t.ex. 5
p	polynomkoefficienter t.ex. 0.5 1.5
l	logisk variabel dvs. T (true) eller F (false)

Transienta egenskaper

5a. Välj

```
->TSAMP 2
->AM 1 -0.3
->INTEG T
```

varmed vi begär att erhålla samplingsperioden 3 sekunder, en önskad pol i 0.3 och integralverkan. Studera ett enkelt adapteringsförlopp och notera vilka parametrar som erhålles. Följande kommandosekvens kan användas:

```
->MANUAL
->ESTIM T
->TUNE T
->RUN
```

Spara undan de resulterande parametrarna med hjälp av kommandot SAVE för senare bruk. Välj därefter

```
->TSAMP  3
->Am  1 -0.3
->INTEG F
```

och studera ett adapteringsförlopp, då integralverkan ej inkorporeras.

— Slutsatser:

Egenskaper hos integralverkan

5b. Välj samma TSAMP och Am som i (a). Låt först INTEG F. Introducera en laststörning med en hävert eller med hjälp av utloppskranen från den övre tanken. Kontrollera och notera regulatorparametrarna före och efter störningen.

Upprepa experimentet med integralverkan INTEG TRUE. Om SAVE utförts i a), så kan denna regulator återhämtas med kommandot LOAD.

— Slutsatser:

Specifikationsparametrars betydelse

5c. Testa hur TSAMP och Am skall väljas i förhållande till varandra. Låt INTEG T.

Val av TSAMP och Am anger kraven på lösningstid och bandbredd hos det slutna systemet. Antag att referensmodellens polpolynom är $A_m(q^{-1}) = 1 - a_m q^{-1}$ för ett visst val av samplingstiden TSAMP. Polen a_m hos A_m motsvarar då den tidskontinuerliga tidskonstanten $\tau = -\text{TSAMP}/\log(a_m)$. I fallet $a_m = 0$ så blir lösningstiden $k \cdot$TSAMP.

Genomför experiment med små börvärdesändringar, och se hur snabbt regulatorn uppnår stationärt tillstånd för olika värden på Am och TSAMP.

Adapteringstider med samplingsperiod h						
TSAMP h	$h = 1.0$	$h = 3.0$	$h = 10.0$	$h = \ldots$	$h = \ldots$	$h = \ldots$
$a_m = 0.0$						
$a_m = 0.3$						
$a_m = 0.7$						

— Slutsatser:

APPENDIX - Adaptiv regulatoralgoritmer

Adaptiv regulator utan integralverkan

– Processmodell:

$$A(q^{-1})y(t) = b_0 q^{-k} B(q^{-1})u(t) + d(t)$$

– Regulatormodell:

$$R(q^{-1})u(t) = -S(q^{-1})y(t) + T(q^{-1})u_c(t)$$

– Referensmodell:

$$y_m(t) = q^{-k}\frac{A_M(1)}{A_M(q^{-1})}u_c(t); \qquad A_M(q^{-1}) = 1 - a_{m_1}q^{-1}$$

– Regulatorekvation:

$$R(q^{-1})A(q^{-1}) + S(q^{-1})b_0 q^{-k} B(q^{-1}) = b_0 A_0(q^{-1}) A_M(q^{-1}) B(q^{-1})$$

$$T(q^{-1}) = A_0(q^{-1})A_M(1); \qquad A_0(q^{-1}) = 1 - a_{0_1}q^{-1}$$

– Parameterskattningsmodell:

$$y(t) = R(q^{-1})\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}u(t)\right) + S(q^{-1})\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}y(t)\right) = \theta^T \varphi(t)$$

– Identifieringsmetod:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\widehat{\theta}(t) = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Adaptiv regulator med integralverkan

- Processmodell:

$$A(q^{-1})y(t) = b_0 q^{-k} B(q^{-1})u(t) + d(t)$$

$$A(q^{-1})\Delta y(t) = b_0 q^{-k} B(q^{-1})\Delta u(t) + \nu(t)$$

- Regulatormodell:

$$R(q^{-1})\Delta u(t) = -S(q^{-1})\Delta y(t) + T(q^{-1})\Delta u_c(t) + \alpha(u_c(t) - y(t))$$

$$\alpha = A_0(1)A_M(1)$$

- Referensmodell:

$$y_m(t) = q^{-k}\frac{A_M(1)}{A_M(q^{-1})}u_c(t); \qquad A_M(q^{-1}) = 1 - a_{m_1}q^{-1}$$

- Regulatorekvation:

$$\Big(R(q^{-1})\Delta\Big)A(q^{-1}) + \Big(\quad S(q^{-1})\Delta + \alpha\Big)b_0 q^{-k}B(q^{-1}) = b_0 A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})B(q^{-1})$$

$$T(q^{-1})\Delta + \alpha = A_0(q^{-1})A_M(1)$$

- Parameterskattningsmodell:

$$y - \frac{\alpha q^{-k}}{A_0 A_M}y = R\left(\frac{\Delta q^{-k}}{A_0 A_M}u(t)\right) + \quad S\left(\frac{\Delta q^{-k}}{A_0 A_M}y(t)\right) = \theta^T\varphi(t)$$

- Identifieringsmetod:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \frac{\alpha}{A_0 A_M}y(t-k) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\widehat{\theta}(t) = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

APPENDIX

Programmet för den rekursiva identifieringen exekveras på en IBM-PC AT. Den exekverbara filen kallas ADAPTOR.LOD och kan hämtas in via diskett placerad i diskettläsaren. Datorn startas via huvudströmbrytare på höger sida. Bildskärmen har en särskild strömbrytare på sin frontpanel. Programmet startas med kommandot:

C:\ >ADAPTOR

och svarar strax med en pil "→". En tablå med regulatorns status erhålles genom att skriva `INDIRE` och därefter trycka på tangentbordets "return".

```
==========================================================
RECURSIVE LEAST SQUARES ESTIMATION
----------------------------------------------------------
Regulatormode: Stop
Estim = false       Diff = false      FF = false
Tsamp =    1.0000   Ulow =  0.0000    Uhigh = 1.0000

Regulator
 nR = 0      R =     1.0000
 nS = 0      S =     1.0000
 nT = 1      T =     0.0000    0.0000
 nV = -1      V =


Estimator
 nA = 1      A =     1.0000    0.0000
 nB = 0      B =     0.0000
 nC = -1      C =

 nF = 0      F =     1.0000
 k = 1       Lambda =     0.9900

----------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna nedan. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1

Betrakta kommandosekvensen

```
->nS 1
->S 2.0 1.0
->k 2
->tsamp 3
->run
->estim TRUE
```

Denna sekvens inleds med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras prediktionshorisonten k till två steg varefter samplingsintervallet TSAMP sättes till 3 sekunder. Med kommandot RUN startas den digitala regulatorn och med ESTIM T körs slutligen parameterskattningen igång.

Om man begär

```
->direct
```

så erhålles följande alternativa tablå

```
==========================================================
ADAPTIVE REGULATOR
----------------------------------------------------------
Regulator Mode: STOP
                                            tsamp = 1.000
Estim = FALSE          Integ= TRUE          ulow  = 0.000
Tune = FALSE           FF    = FALSE        uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0      R =    1.0000
 nS = 0      S =    1.0000
 nT = 1      T =    0.0000   0.0000
 nV = -1      V =


Estimator
 nR = 0      R =    1.0000
 nS = 0      S =    1.0000
 nV = -1     V =
 nF = 2      F =    1.0000  -1.0000 0.2100
 nA0= 1      A0=    1.0000  -0.7000
 nAm= 1      Am=    1.0000  -0.3000

 k = 1   Lambda =    0.9900

----------------------------------------------------------
```

Nedan följer en översikt över tillgängliga kommandon

RUN	Start av regulatorn
MANUAL	Manuell reglering med $u := u_c$
STOP	Regulator, parameterskattning stänges av
EXIT	Regulator stänges av; Exekvering avbrytes; Återvänder till DOS
ESTIM 1	Parameterskattning påbörjas/avbrytes
TUNE 1	Regulatortrimning påbörjas/avbrytes
DIFF 1	Differensbildning av data i skattningsalgoritmen till/från
INTEG 1	Integralverkan i adaptiva regulatorn till/från
FF 1	Framkoppling till/från

TSAMP r	Samplingsperiod i sekunder
ULOW r	Undre begränsning för styrsignalen u
UHIGH r	Övre begränsning för styrsignalen u
RO r	Koefficient för styrsignalviktning enligt Clark-Gawthrop
DIRECT l	Direkt adaptiv reglering till/från
INDIRE l	Indirekt adaptiv reglering till/från
CLARKG l	Clark-Gawthrop viktning till/från
NR i	Regulatorpolynomet R:s gradtal
NS i	Regulatorpolynomet S:s gradtal
NT i	Regulatorpolynomet T:s gradtal
NV i	Regulatorpolynomet V:s gradtal
R p	Regulatorpolynomet R sättes till värdet p
S p	Regulatorpolynomet S sättes till värdet p
T p	Regulatorpolynomet T sättes till värdet p
V p	Regulatorpolynomet V sättes till värdet p
NA i	Modellpolynomet A:s gradtal
NB i	Modellpolynomet B:s gradtal
NC i	Modellpolynomet C:s gradtal
NF i	Filterpolynomet F:s gradtal
NA0 i	Observatörspolynomet A0:s gradtal
NAm i	Referensmodellens polpolynom Am:s gradtal
A p	Modellpolynomet A sättes till värdet p
B p	Modellpolynomet B sättes till värdet p
C p	Modellpolynomet C sättes till värdet p
F p	Filterpolynomet F sättes till värdet p
A0 p	Observatörspolynomet A0 sättes till värdet p
Am p	Referensmodellens polpolynom *Am* sättes till värdet p
K i	Prediktionshorisont; Antal samplingsperioder
LAMBDA r	Glömskefaktor i intervallet (0,1)
SHOW	Parameterstatus visas
BACKUP	Reservregulatorns parameterstatus visas
LOAD	Reservregulatorn/estimatorn aktiveras
SAVE	Den aktiva regulatorn/estimatorn kopieras och sparas
SHOW SIG	Signaler u, y, uc, v visas m.a.p tiden
SHOW A	Skattade parametrar i A-polynomet visas
SHOW B	Skattade parametrar i B-polynomet visas
SHOW C	Skattade parametrar i C-polynomet visas
P	P-matrisen redovisas
P0 r	P-matrisens initialvärde sättes
EQUIL	Jämviktsnivåer läses in

IDENTIFIERING

OCH ADAPTIV REGLERING

LABORATION 4

Författare:

Rolf Johansson

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola, Lund
Oktober 1987

1. INTRODUKTION

Denna laboration avser att belysa adaptiv reglering av en enkel laboratorieprocess för nivåreglering.

I den första uppgiften testas den adaptiva regulatorns egenskaper när några av dess parametrar varieras. Därefter skall ett system med tidsfördröjning regleras. Till sist kommer ett experiment med självinställande framkoppling.

Rekvisita:

- Tankprocess
- IBM-PC AT
- Adaptor - Program för adaptiv reglering
- Börvärdespotentiometer

Tankprocessen utgöres av en tank med fritt utlopp, där man styr pumpen för inflödet och mäter nivån i vardera tanken.

Laborationen skall genomföras med ett program, som implementerar en självinställande regulator på en IBM-PC AT processdator.

2. BESKRIVNING AV REGULATORPROGRAMMET

En kortfattad beskrivning av de regulatoralgoritmer som används ges nedan. Inga egentliga härledningar ges här. Den som är intresserad av detaljer hänvisas till att studera föreläsningsanteckningarna från avsnittet om självinställande regulatorer.

Regulatorprogrammet ADAPTOR innehåller på generell form ett antal olika algoritmer för rekursiv identifiering adaptiv reglering. En utav dessa utgöres av en adaptiv regulator för polplacering av en pol. En annan algoritm har dessutom givits den speciella egenskapen att integralverkan obligatoriskt ingår. Det finns också indirekt (explicit) adaptiv reglering och en självinställande regulator ad modum Clark-Gawthrop.

Följande beteckningar används nedan:

u :	Styrsignal
y :	Mätsignal
u_c :	Referensvärde
y_m :	Referensmodellens utsignal
v :	Mätbar störning; Framkopplingssignal
d :	Stegformad störning; Lågfrekvent störning
ν :	Störning

A	Processens polpolynom
B	Processens nollställespolynom
b_0	Förstärkning
k	Processens tidfördröjning
R	Regulatorpolynom m.a.p. u
S	Regulatorpolynom m.a.p. y
T	Regulatorpolynom m.a.p. u_c

Δ	Differensbildning; $1-q^{-1}$
A_0	Observatörspolynom $1-tq^{-1}$
A_M	Önskat polpolynom $1-pq^{-1}$
θ	Parametervektor
φ	Regressionvektor
ε	Prediktionsfel

En kort beskrivning av den första algoritmen ges av följande uttryck. Pilarna under vissa uttryck visar vad, som skall lösas ur respektive ekvation. Beteckningarna anges ovan och är desamma som de som har förekommit under föreläsningarna.

Adaptiv regulator utan integralverkan

- Processmodell:

$$A(q^{-1})\underset{\uparrow}{y(t)} = b_0 q^{-k} B(q^{-1}) u(t) + d(t)$$

- Regulatormodell:

$$R(q^{-1})\underset{\uparrow}{u(t)} = -S(q^{-1})y(t) + T(q^{-1})u_c(t)$$

- Referensmodell:

$$\underset{\uparrow}{y_m(t)} = q^{-k}\frac{A_M(1)}{A_M(q^{-1})}u_c(t); \qquad A_M(q^{-1}) = 1 - a_{m_1}q^{-1}$$

- Regulatorekvation:

$$\underset{\uparrow}{R}(q^{-1})A(q^{-1}) + \underset{\uparrow}{S}(q^{-1})b_0q^{-k}B(q^{-1}) = b_0A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})B(q^{-1})$$

$$\underset{\uparrow}{T}(q^{-1}) = A_0(q^{-1})A_M(1); \qquad A_0(q^{-1}) = 1 - a_{0_1}q^{-1}$$

- Parameterskattningsmodell:

$$y(t) = \underset{\uparrow}{R}(q^{-1})\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}u(t)\right) + \underset{\uparrow}{S}(q^{-1})\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}y(t)\right) = \widehat{\theta}^T\varphi(t)$$

- Identifieringsmetod:

$$\underset{\uparrow}{\varepsilon(t)} = y(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$\underset{\uparrow}{P(t)} = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\underset{\uparrow}{\widehat{\theta}(t)} = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Handhavande

I programmet utnyttjas analoga in- och utgångar till IBM-PC AT enligt följande:

AD 0:	u_c	Referensvärde
AD 1:	y	Mätvärde
AD 2:	v	Framkopplingssignal; Mätbar störning
DA 0:	u	Styrsignal

Programmet ADAPTOR startas på IBM-PC med kommandot:

C:\ >ADAPTOR

och svarar strax med en pil '– >' Om man då besvarar denna med ett godtyckligt kommando eller trycker på tangentbordets "return" så erhålles följande tablå med regulatorns status.

```
==========================================================
ADAPTIVE REGULATOR
----------------------------------------------------------
Regulator Mode: STOP
                                           tsamp = 1.000
Estim = FALSE          Integ= TRUE         ulow  = 0.000
Tune = FALSE           FF    = FALSE       uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nT = 1     T =    0.0000   0.0000
 nV = -1     V =


Estimator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nV = -1    V =
 nF = 2     F =    1.0000  -1.0000 0.2100
 nAO= 1     AO=    1.0000  -0.7000
 nAm= 1     Am=    1.0000  -0.3000

 k = 1   Lambda =    0.9900

----------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna i appendix. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1

Betrakta följande kommandosekvens

```
->MANUAL
->nS 1
->S 2.0 1.0
```

```
->k 3
->TSAMP 3
->RUN
->ESTIM T
```

Denna inleds med begäran om manuell reglering och fortsätter med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras prediktionshorisonten k till tre, varefter samplingsintervallet TSAMP sättes till 3 sekunder. Med kommandot "RUN" startas den digitala regulatorn och med "ESTIM T" körs slutligen parameterskattningen igång.

3. DEN ÖVRE TANKENS DYNAMIK

En olinjär modell av tankens dynamik mellan insignalen u till pumpen och nivån h_1 är

$$\frac{dh}{dt} = -c_1 \cdot \sqrt{2gh_1(t)} + bu(t)$$

Denna modell kan linjäriseras kring en jämviktsnivå $h_0 = 10 \quad [cm]$. Inför beteckningen $y(t) = h_1(t) - h_0$ för nivåns avvikelse från jämviktsnivån. Processen beskrivs väl av överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{0.05}{s+0.0148} = \frac{3.38}{1+s67.7}$$

kring vattennivån 10 cm i övre tanken. Observera att detta gäller för en av uppställningarna och att det kan finnas vissa variationer mellan de olika exemplaren.

En tidsdiskret modell med samplingsintervallet h [s] får då formen

$$y(t+h) = -a_1 y(t) + b_0 u(t)$$

eller

$$y(t) = \frac{b_0}{q+a_1} u(t) = \frac{b_0 q^{-1}}{1+a_1 q^{-1}} u(t)$$

med

$$a_1 = -\exp(-ah) \qquad b_0 = \frac{b}{a}(1-\exp(-ah))$$

Här nedan följer en lista på den tidsdiskreta överföringsfunktionens koefficienter för några olika val av samplingstiden h.

h	0.1	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0	100	300
a_1	-0.999	-0.996	-0.985	-0.957	-0.863	-0.642	-0.228	-0.012
b_0	50E-4	15E-3	0.050	0.147	0.465	1.21	2.61	3.34

Dessa värden kan tjäna som jämförelsematerial till de resultat, som vi kommer att erhålla. Var inte alltör dogmatisk vid jämförelser, eftersom variationer förekommer.

4. IDENTIFIERING AV DEN ÖVRE TANKEN

Rekursiv identifiering enligt minstakvadrat-metod erhålles genom att begära

```
->manual
->indire
->mean 0.25
->per 50
->amp 0.05
```

Det kan vara lämpligt att starta med ett experiment enligt följande

```
->tsamp 3
->nA 1
->nB 0
->lambda 1
->estim t
```

Titta på hur parametrarna konvergerar och avgör om dessa värden överensstämmer med förväntade värden. Tag reda på P-matrisens innebörd. Begär

```
->P
```

Hur påverkar exciteringssignalen kvaliteten på skattningarna? Kontrollera genom att sätta

```
->amp 0
```

Studera kvaliteten och beteendet hos skattningarna och P-matrisen. Förklara orsakerna till den dåliga konvergensen.

5. ADAPTIV NIVÅREGLERING AV ÖVRE TANKEN

Resultaten av rekursiv identifiering kan utnyttjas direkt för bättre reglering. Det går att vi sätta polynomgradtalen som $nR = 0$, $nS = 1$, $nV = -1$ (ingen framkoppling utnyttjas), och prediktionshorisonten $k = 3$. Detta åstadkommes med kommandosekvensen

```
->lambda 0.99
->direct
->nR 0
->nS 1
->nV -1
->k 3
```

Det brukar rekommenderas i litteraturen att man vid försöken startar i stationärt tillstånd med nivån ungefär lika med börvärdet. Man genomför därefter "små" variationer av nivån kring 10 cm. Detta åstadkommes enklast genom manuell reglering. Detta är dock ej helt nödvändigt. Notera genomgående vilka parametrar, som används av regulatorn.

a: Transienta egenskaper

Välj

```
->TSAMP 1
->AO 1 -0.7
->AM 1 -0.3
->INTEG T
```

varmed vi begär att erhålla samplingsperioden 1 sekunder, en önskad pol i 0.3 och integralverkan. Observatörspolen har placerats i 0.7. Studera ett enkelt adapteringsförlopp och notera vilka parametrar som erhålles. Följande kommandosekvens kan användas:

```
->MANUAL
->ESTIM T
->TUNE T
->RUN
```

Spara undan de resulterande parametrarna med hjälp av kommandot "SAVE" för senare bruk. Välj därefter TSAMP = 3, Am = $1 - 0.3q^{-1}$, INTEG = $false$ och studera ett adapteringsförlopp, då integralverkan ej inkorporeras

Slutsatser:

b: Egenskaper hos integralverkan

Välj samma TSAMP och Am som i (a). Låt först INTEG = FALSE. Introducera en laststörning med en hävert eller med hjälp av utloppskranen från den övre tanken. Kontrollera regulatorparametrarna före och efter störningen.

Upprepa experimentet med integralverkan (INTEG TRUE). Om "SAVE" utförts i a), så kan denna regulator återhämtas med kommandot "LOAD".

Slutsatser:

c: Prediktionshorisontens betydelse

Parameterskattningarna anpassar följande modell

$$y(t) = R\left(\frac{q^{-k}}{A_m A_0}u(t)\right) + S\left(\frac{q^{-k}}{A_m A_0}y(t)\right)$$

där k utgör *prediktionshorisont.* Teorin för identifiering och rekommenderar 6-8 sampel på systemets tidskonstant. Ofta är detta oacceptabelt långt samplingsintervall för regleringen. Man kan därför använda k för att harmonisera kraven mellan identifiering och reglering. Vad uppnås om k ökas? Vad innebär detta för regleringen resp. parameterskattningen?

Slutsatser:

d: Specifikationsparametrars betydelse

Specifikationsparametrarna har en speciell betydelse i adaptiv reglering, eftersom de direkt påverkar skattningarnas kvalitet. Här skall testas hur TSAMP och Am skall väljas i förhållande till varandra. Låt INTEG = TRUE.

TSAMP och Am ger krav på lösningstiden och bandbredden hos slutna systemet. Inför beteckningen p för polen hos modellpolynomet Am. Polen p hos Am och samplingsintervallet TSAMP motsvarar den tidskontinuerliga tidskonstanten $T_c = -TSAMP/ln(p)$. Då $p = 0.0$ blir lösningstiden $k \cdot TSAMP$.

Det går att fortsätta direkt från uppgift b. Gör små börvärdesändringar ($\approx$ 10%) och se hur snabbt regulatorn når stationärt tillstånd. Variera Am (t.ex. $1 - 0.3q^{-1}$ resp. $1 - 0q^{-1}$), $A0$ (t.ex. $1 - 0.7q^{-1}$ resp. $1 - 0q^{-1}$), och TSAMP (1, 3, 10 [s]). Det är lämpligt att välja $k = 3$.

Lämpliga testvärden kan vara följande TSAMP och p enligt ordningsföljden:

TSAMP=	1.0	3.0	5.0	10.0
p=0.0	3	1	2	
p=0.3	6			
p=0.5	4			
p=0.7	5			

Slutsatser:

6. INDIREKT ADAPTIV REGLERING

Gör även motsvarande experiment med indirekt (explicit) adaptiv regulator. Denna erhålles genom kommandot:

```
->INDIRE
```

varvid man erhåller en alternativ tablå, se appendix.

a. Gör lämpligt modellordningsval för A och B med standardinställningen

```
->Am 1 -0.3
->A0 1 -0.7
->k 1
->ESTIM T
->TUNE t
->RUN
```

Granska reglering och parameterkonvergens. Granska hur regulatorn reagerar för laststörningar.

b. Differensbilda signalerna med

```
->DIFF t
```

Vad händer med skattningar och konvergens? Studera regleringen. Granska hur regulatorn reagerar för laststörningar.

7. TIDSFÖRDRÖJNING

I denna uppgift introduceras en tidsfördröjning för styrsignalen för att efterlikna en variabel transportfördröjning.

Välj exempelvis TSAMP = 2, $Am = 1 - 0.3q^{-1}$, $A0 = 1 - 0.7q^{-1}$, $k = 1$, nS = 1, INTEG = TRUE.

a Fördröjning ett samplingsintervall

Låt adapteringen ställa in sig till ett tillfredsställande resultat. Introducera därefter en transportfördröjning med storleken ett samplingsintervall med hjälp av kommandot

```
->DELAY 1
```

varmed styrsignalen fördröjs ett samplingsintervall. Notera omadapteringen. Ändra prediktionshorisonten, om så behövs. Förändra regulatorkomplexiteten, om så blir nödvändigt. Låt exempelvis nR = 1, k = 2. Låt adapteringen ske och testa därefter börvärdesändring och laststörning.

Slutsatser:

b Fördröjning två samplingsintervall

Använd kommandot "DELAY 2", varmed styrsignalen fördröjs två samplingsintervall. Låt vidare nR = 2, k = 5. Låt adapteringen ske och testa därefter börvärdesändring och laststörning.

Slutsatser:

Diskussion

Hur skulle en PI-regulator bete sig i en motsvarande situation med varierande dödtid? Vad händer, om man väljer för liten prediktionshorisont k?

8. FRAMKOPPLING

Framkoppling är känslig för modellfel. Om regulatorn kan adaptera framkopplingsparametrarna så har man bättre möjligheter att få den att fungera tillfredsställande.

Tankprocessen kopplas till IBM-PC AT:s AD-omvandlare enligt följande:

AD 0: u_c Referensvärde

AD 1:	y	Tank 2
AD 2:	v	Tank 1; Framkopplingssignal
DA 0:	u	Styrsignal till pump
Jord	0	Jord

I uppgiften skall vi testa hur pass mycket framkoppling från mätsignalen v kan reducera reglerfelet. Överföringsfunktionen mellan v och nivån i tank 2 dvs processens utsignal motsvarar ungefär ett långsamt lågpassfilter.

Försök först att bedöma vilken regulatorkomplexitet som kan vara en god ansats. Prova adaptering utan framkoppling, lagra undan parametrarna med "SAVE" och inför därefter framkoppling.

Slutsatser:

1. APPENDIX

Programmet för den rekursiva identifieringen exekveras på en IBM-PC AT. Den exekverbara filen kallas ADAPTOR.LOD och kan hämtas in via diskett placerad i diskettläsaren. Datorn startas via huvudströmbrytare på höger sida. Bildskärmen har en särskild strömbrytare på sin frontpanel. Programmet startas med kommandot:

C:\ >ADAPTOR

och svarar strax med en pil '– >'. En tablå med regulatorns status erhålles genom att trycka på tangentbordets "return".

```
=========================================================
ADAPTIVE REGULATOR
---------------------------------------------------------
Regulator Mode: STOP
                                          tsamp = 1.000
Estim = FALSE         Integ= TRUE         ulow  = 0.000
Tune = FALSE          FF   = FALSE        uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nT = 1     T =    0.0000   0.0000
 nV = -1     V =


Estimator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nV = -1    V =
 nF = 2     F =    1.0000  -1.0000 0.2100
 nA0= 1     A0=    1.0000  -0.7000
 nAm= 1     Am=    1.0000  -0.3000

 k = 1   Lambda =    0.9900

---------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna nedan. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1

Betrakta kommandosekvensen

```
->nS 1
->S 2.0 1.0
->k 2
->tsamp 3
->run
->estim TRUE
```

Denna sekvens inleds med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras prediktionshorisonten k till två steg varefter samplingsintervallet TSAMP sättes till 3 sekunder. Med kommandot RUN startas den digitala regulatorn och med ESTIM T körs slutligen parameterskattningen igång.

Om man begär

```
->indire
```

så erhålles följande alternativa tablå

```
=========================================================
RECURSIVE LEAST SQUARES IDENTIFICATION
---------------------------------------------------------
Regulatormode: Stop                     tsamp = 1.000
Estim = false       Diff = false        ulow  = 0.000
Tune  = false       Ff   = false        uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nT = 1     T =    0.0000   0.0000
 nV = -1     V =


Estimator
 nA = 1     A =    1.0000   0.0000
 nB = 0     B =    0.0000
 nC = -1     C =

 nF = 0     F =    1.0000
 k = 1      Lambda =    0.9900

---------------------------------------------------------
```

Nedan följer en översikt över tillgängliga kommandon

RUN	Start av regulatorn
MANUAL	Manuell reglering med $u := u_c$
STOP	Regulator, parameterskattning stänges av
EXIT	Regulator stänges av; Exekvering avbrytes; Återvänder till DOS
ESTIM l	Parameterskattning påbörjas/avbrytes
TUNE l	Regulatortrimning påbörjas/avbrytes
DIFF l	Differensbildning av data i skattningsalgoritmen till/från
INTEG l	Integralverkan i adaptiva regulatorn till/från
FF l	Framkoppling till/från
TSAMP r	Samplingsperiod i sekunder
ULOW r	Undre begränsning för styrsignalen u
UHIGH r	Övre begränsning för styrsignalen u
RO r	Koefficient för styrsignalviktning enligt Clark-Gawthrop

DIRECT 1	Direkt adaptiv reglering till/från
INDIRE 1	Indirekt adaptiv reglering till/från
CLARKG 1	Clark-Gawthrop viktning till/från
NR i	Regulatorpolynomet R:s gradtal
NS i	Regulatorpolynomet S:s gradtal
NT i	Regulatorpolynomet T:s gradtal
NV i	Regulatorpolynomet V:s gradtal
R p	Regulatorpolynomet R sättes till värdet p
S p	Regulatorpolynomet S sättes till värdet p
T p	Regulatorpolynomet T sättes till värdet p
V p	Regulatorpolynomet V sättes till värdet p
NA i	Modellpolynomet A:s gradtal
NB i	Modellpolynomet B:s gradtal
NC i	Modellpolynomet C:s gradtal
NF i	Filterpolynomet F:s gradtal
NA0 i	Observatörspolynomet A0:s gradtal
NAm i	Referensmodellens polpolynom Am:s gradtal
A p	Modellpolynomet A sättes till värdet p
B p	Modellpolynomet B sättes till värdet p
C p	Modellpolynomet C sättes till värdet p
F p	Filterpolynomet F sättes till värdet p
A0 p	Observatörspolynomet A0 sättes till värdet p
Am p	Referensmodellens polpolynom Am sättes till värdet p
K i	Prediktionshorisont; Antal samplingsperioder
LAMBDA r	Glömskefaktor i intervallet (0,1)
SHOW	Parameterstatus visas
BACKUP	Reservregulatorns parameterstatus visas
LOAD	Reservregulatorn/estimatorn aktiveras
SAVE	Den aktiva regulatorn/estimatorn kopieras och sparas
SHOW SIG	Signaler u, y, uc, v visas m.a.p tiden
SHOW A	Skattade parametrar i A-polynomet visas
SHOW B	Skattade parametrar i B-polynomet visas
SHOW C	Skattade parametrar i C-polynomet visas
P	P-matrisen redovisas
P0 r	P-matrisens initialvärde sättes
EQUIL	Jämviktsnivåer läses in
EQUIL0	Jämviktsnivåer nollställes
AMP r	Amplitud för intern referensvärdeskälla läses in
PER r	Periodtid [s] för intern fyrkantvåg läses
MEAN r	Medelvärde för intern signalgenerator läses in

DELAY i	Intern fördröjning av styrsignal; Antal samplingsperioder
FILTER l	Lågpassfiltrering/Högpassfiltrering
EXTREF l	Referensvärde tages via AD-omvandlare 0
INTREF l	Internt referensvärde slages till/från

där

r	reellt tal t.ex. 0.99
i	heltal t.ex. 5
p	polynomkoefficienter t.ex. 0.5 1.5
l	logisk variabel dvs. T (true) eller F (false)

ADAPTIV REGLERING

LABORATION 2

Författare:
Rolf Johansson

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola, Lund
Oktober 1987

1. INTRODUKTION

Denna laboration avser att belysa adaptiv reglering av en enkel laboratorieprocess för nivåreglering.

I den första uppgiften testas den adaptiva regulatorns egenskaper när några av dess parametrar varieras. Därefter skall ett system med tidsfördröjning regleras. Till sist kommer ett experiment med självinställande framkoppling.

Rekvisita:

- Tankprocess
- IBM-PC AT
- Adaptor - Program för adaptiv reglering
- Börvärdespotentiometer

Tankprocessen utgöres av en tank med fritt utlopp, där man styr pumpen för inflödet och mäter nivån i vardera tanken.

Laborationen skall genomföras med ett program, som implementerar en självinställande regulator på en IBM-PC AT processdator.

2. BESKRIVNING AV REGULATORPROGRAMMET

En kortfattad beskrivning av de regulatoralgoritmer som används ges nedan. Inga egentliga härledningar ges här. Den som är intresserad av detaljer hänvisas till att studera föreläsningsanteckningarna från avsnittet om självinställande regulatorer.

Regulatorprogrammet ADAPTOR innehåller ett antal olika algoritmer för adaptiv reglering. En utav dessa utgöres av en adaptiv regulator för polplacering av en pol. En annan algoritm har dessutom givits den speciella egenskapen att integralverkan obligatoriskt ingår. Det finns också indirekt (explicit) adaptiv reglering och en självinställande regulator ad modum Clark-Gawthrop.

Följande beteckningar används nedan:

u : Styrsignal
y : Mätsignal
u_c : Referensvärde
y_m :Referensmodellens utsignal
v : Mätbar störning; Framkopplingssignal
d : Stegformad störning; Lågfrekvent störning
ν : Störning

A Processens polpolynom
B Processens nollställespolynom
b_0 Förstärkning
k Processens tidfördröjning
R Regulatorpolynom m.a.p. u
S Regulatorpolynom m.a.p. y
T Regulatorpolynom m.a.p. u_c

Δ Differensbildning; $1 - q^{-1}$

A_0 Observatörspolynom $1 - tq^{-1}$

A_M Önskat polpolynom $1 - pq^{-1}$

θ Parametervektor

φ Regressionvektor

ε Prediktionsfel

En kort beskrivning av den första algoritmen ges av följande uttryck. Pilarna under vissa uttryck visar vad, som skall lösas ur respektive ekvation. Beteckningarna anges ovan och är desamma som de som har förekommit under föreläsningarna.

Adaptiv regulator utan integralverkan

– Processmodell:

$$A(q^{-1})\underset{\uparrow}{y(t)} = b_0 q^{-k} B(q^{-1}) u(t) + d(t)$$

– Regulatormodell:

$$R(q^{-1})\underset{\uparrow}{u(t)} = -S(q^{-1})y(t) + T(q^{-1})u_c(t)$$

– Referensmodell:

$$\underset{\uparrow}{y_m(t)} = q^{-k}\frac{A_M(1)}{A_M(q^{-1})}u_c(t); \qquad A_M(q^{-1}) = 1 - a_{m_1}q^{-1}$$

– Regulatorekvation:

$$\underset{\uparrow}{R(q^{-1})}A(q^{-1}) + \underset{\uparrow}{S(q^{-1})}b_0 q^{-k}B(q^{-1}) = b_0 A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})B(q^{-1})$$

$$\underset{\uparrow}{T(q^{-1})} = A_0(q^{-1})A_M(1); \qquad A_0(q^{-1}) = 1 - a_{0_1}q^{-1}$$

– Parameterskattningsmodell:

$$y(t) = \underset{\uparrow}{R(q^{-1})}\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}u(t)\right) + \underset{\uparrow}{S(q^{-1})}\left(\frac{q^{-k}}{A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})}y(t)\right) = \widehat{\theta}^T\varphi(t)$$

– Identifieringsmetod:

$$\underset{\uparrow}{\varepsilon(t)} = y(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$\underset{\uparrow}{P(t)} = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\underset{\uparrow}{\widehat{\theta}(t)} = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Adaptiv regulator med integralverkan

– Processmodeller:

$$A(q^{-1})y(t) = b_0 q^{-k} B(q^{-1})u(t) + d(t)$$

$$A(q^{-1})\Delta y(t) = b_0 q^{-k} B(q^{-1})\Delta u(t) + \nu(t)$$

– Regulatormodell:

$$R(q^{-1})\Delta u(t) = -S(q^{-1})\Delta y(t) + T(q^{-1})\Delta u_c(t) + \alpha(u_c(t) - y(t))$$

$$\alpha = A_0(1)A_M(1)$$

– Referensmodell:

$$y_m(t) = q^{-k}\frac{A_M(1)}{A_M(q^{-1})}u_c(t); \qquad A_M(q^{-1}) = 1 - a_{m_1}q^{-1}$$

– Regulatorekvation:

$$\Big(R(q^{-1})\Delta\Big)A(q^{-1}) + \Big(\quad S(q^{-1})\Delta + \alpha\Big)b_0 q^{-k}B(q^{-1}) = b_0 A_0(q^{-1})A_M(q^{-1})B(q^{-1})$$

$$T(q^{-1})\Delta + \alpha = A_0(q^{-1})A_M(1)$$

– Parameterskattningsmodell:

$$y - \frac{\alpha q^{-k}}{A_0 A_M}y = R\left(\frac{\Delta q^{-k}}{A_0 A_M}u(t)\right) + \quad S\left(\frac{\Delta q^{-k}}{A_0 A_M}y(t)\right) = \theta^T\varphi(t)$$

– Identifieringsmetod:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \frac{\alpha}{A_0 A_M}y(t) - \widehat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}\right)$$

$$\widehat{\theta}(t) = \widehat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)\varepsilon(t)$$

Handhavande

I programmet utnyttjas analoga in- och utgångar till IBM-PC AT enligt följande:

AD 0:	u_c	Referensvärde
AD 1:	y	Mätvärde
AD 2:	v	Framkopplingssignal; Mätbar störning
DA 0:	u	Styrsignal

Programmet ADAPTOR startas på IBM-PC med kommandot:

C:\ >ADAPTOR

och svarar strax med en pil '− >' Om man då besvarar denna med ett godtyckligt kommando eller trycker på tangentbordets "return" så erhålles följande tablå med regulatorns status.

```
===========================================================
ADAPTIVE REGULATOR
-----------------------------------------------------------
Regulator Mode: STOP
                                                tsamp = 1.000
Estim = FALSE           Integ= TRUE             ulow  = 0.000
Tune = FALSE            FF    = FALSE           uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0       R =     1.0000
 nS = 0       S =     1.0000
 nT = 1       T =     0.0000    0.0000
 nV = -1       V =


Estimator
 nR = 0       R =     1.0000
 nS = 0       S =     1.0000
 nV = -1      V =
 nF = 2       F =     1.0000   -1.0000 0.2100
 nA0= 1       A0=     1.0000   -0.7000
 nAm= 1       Am=     1.0000   -0.3000

 k = 1   Lambda =      0.9900

-----------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna i appendix. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1

Betrakta följande kommandosekvens

```
->MANUAL
->nS 1
->S 2.0 1.0
```

```
->k 3
->TSAMP 3
->RUN
->ESTIM T
```

Denna inleds med begäran om manuell reglering och fortsätter med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras prediktionshorisonten k till tre, varefter samplingsintervallet TSAMP sättes till 3 sekunder. Med kommandot "RUN" startas den digitala regulatorn och med "ESTIM T" körs slutligen parameterskattningen igång.

3. NIVÅREGLERING AV ÖVRE TANKEN

Processen beskrivs väl av överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{0.05}{s+0.0148} = \frac{3.38}{1+s67.7}$$

kring vattennivån 10 cm i övre tanken. Observera att detta gäller för en av uppställningarna och att det kan finnas vissa variationer mellan de olika exemplaren.

En tidsdiskret modell med samplingsintervallet h [s] får då formen

$$y(t+h) = -a_1 y(t) + b_0 u(t)$$

eller

$$y(t) = \frac{b_0}{q+a_1} u(t) = \frac{b_0 q^{-1}}{1+a_1 q^{-1}} u(t)$$

med

$$a_1 = -\exp(-ah) \qquad b_0 = \frac{b}{a}(1-\exp(-ah))$$

Här nedan följer en lista på den tidsdiskreta överföringsfunktionens koefficienter för några olika val av samplingstiden h.

h	0.1	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0	100	300
a_1	-0.999	-0.996	-0.985	-0.957	-0.863	-0.642	-0.228	-0.012
b_0	50E-4	15E-3	0.050	0.147	0.465	1.21	2.61	3.34

Dessa värden kan tjäna som jämförelsematerial till de resultat, som vi kommer att erhålla.

Därför kan vi sätta polynomgradtalen som $nR = nS = 0$, $nV = -1$ (ingen framkoppling utnyttjas), och prediktionshorisonten $k = 1$. Detta åstadkommes med kommandosekven sen

```
->nR 0
->nS 0
->nV -1
->k 1
```

Det brukar rekommenderas i litteraturen att man vid försöken startar i stationärt tillstånd med nivån ungefär lika med börvärdet. Man genomför därefter "små" variationer av nivån kring 10 cm. Detta åstadkommes enklast genom manuell reglering. Detta är dock ej helt nödvändigt. Notera genomgående vilka parametrar, som används av regulatorn.

a: Transienta egenskaper

Välj

```
->TSAMP 3
->AO 1 -0.7
->AM 1 -0.3
->INTEG T
```

varmed vi begär att erhålla samplingsperioden 3 sekunder, en önskad pol i 0.3 och integralverkan. Observatörspolen har placerats i 0.7. Studera ett enkelt adapteringsförlopp och notera vilka parametrar som erhålles. Följande kommandosekvens kan användas:

```
->MANUAL
->ESTIM T
->TUNE T
->RUN
```

Spara undan de resulterande parametrarna med hjälp av kommandot "SAVE" för senare bruk. Välj därefter TSAMP = 3, Am = $1 - 0.3q^{-1}$, INTEG = *false* och studera ett adapteringsförlopp, då integralverkan ej inkorporeras

Slutsatser:

b: Egenskaper hos integralverkan

Välj samma TSAMP och Am som i (a). Låt först INTEG = FALSE. Introducera en last-störning med en hävert eller med hjälp av utloppskranen från den övre tanken. Kontrollera regulatorparametrarna före och efter störningen.

Upprepa experimentet med integralverkan (INTEG TRUE). Om "SAVE" utförts i a), så kan denna regulator återhämtas med kommandot "LOAD".

Slutsatser:

c: Prediktionshorisontens betydelse

Parameterskattningarna anpassar följande modell

$$y(t) = R(\frac{q^{-k}}{A_m A_0} u(t)) + S(\frac{q^{-k}}{A_m A_0} y(t))$$

där k utgör *prediktionshorisont.* Teorin för identifiering och rekommenderar 6-8 sampel på systemets tidskonstant. Ofta är detta oacceptabelt långt samplingsintervall för regleringen. Man kan därför använda k för att harmonisera kraven mellan identifiering och reglering. Vad uppnås om k ökas? Vad innebär detta för regleringen resp. parameterskattningen?

Slutsatser:

d: Specifikationsparametrars betydelse

Specifikationsparametrarna har en speciell betydelse i adaptiv reglering, eftersom de direkt påverkar skattningarnas kvalitet. Här skall testas hur TSAMP och Am skall väljas i förhållande till varandra. Låt INTEG = TRUE.

TSAMP och Am ger krav på lösningstiden och bandbredden hos slutna systemet. Inför beteckningen p för polen hos modellpolynomet Am. Polen p hos Am och samplingsintervallet TSAMP motsvarar den tidskontinuerliga tidskonstanten $T_c = -TSAMP/ln(p)$. Då $p = 0.0$ blir lösningstiden $k \cdot TSAMP$.

Det går att fortsätta direkt från uppgift b. Gör små börvärdesändringar ($\approx 10\%$) och se hur snabbt regulatorn når stationärt tillstånd. Variera Am (t.ex. $1 - 0.3q^{-1}$ resp. $1 - 0q^{-1}$), $A0$ (t.ex. $1 - 0.7q^{-1}$ resp. $1 - 0q^{-1}$), och TSAMP (1, 3, 10 [s]). Det är lämpligt att välja $k = 3$.

Lämpliga testvärden kan vara följande TSAMP och p enligt ordningsföljden:

TSAMP=	1.0	3.0	5.0	10.0
p=0.0	3	1	2	
p=0.3	6			
p=0.5	4			
p=0.7	5			

Slutsatser:

4. INDIREKT ADAPTIV REGLERING

Gör även motsvarande experiment med indirekt (explicit) adaptiv regulator. Denna erhålles genom kommandot:

```
->INDIRE
```

varvid man erhåller en alternativ tablå, se appendix.

a. Gör lämpligt modellordningsval för A och B med standardinställningen

```
->Am 1 -0.3
->AO 1 -0.7
->k 1
->ESTIM T
->TUNE t
->RUN
```

Granska reglering och parameterkonvergens. Granska hur regulatorn reagerar för laststörningar.

b. Differentiera signalerna med

```
->DIFF t
```

Vad händer med skattningar och konvergens? Studera regleringen. Granska hur regulatorn reagerar för laststörningar.

5. TIDSFÖRDRÖJNING

I denna uppgift introduceras en tidsfördröjning för styrsignalen för att efterlikna en variabel transportfördröjning.

Välj exempelvis TSAMP = 2, $Am = 1 - 0.3q^{-1}$, $A0 = 1 - 0.7q^{-1}$, $k = 1$, nS = 1, INTEG = TRUE.

a Fördröjning ett samplingsintervall

Låt adapteringen ställa in sig till ett tillfredsställande resultat. Introducera därefter en transportfördröjning med storleken ett samplingsintervall med hjälp av kommandot

```
->DELAY 1
```

varmed styrsignalen fördröjs ett samplingsintervall. Notera omadapteringen. Ändra prediktionshorisonten, om så behövs. Förändra regulatorkomplexiteten, om så blir nödvändigt. Låt exempelvis nR = 1, k = 2. Låt adapteringen ske och testa därefter börvärdesändring och laststörning.

Slutsatser:

b Fördröjning två samplingsintervall

Använd kommandot "DELAY 2", varmed styrsignalen fördröjs två samplingsintervall. Låt vidare nR = 2, k = 3. Låt adapteringen ske och testa därefter börvärdesändring och laststörning.

Slutsatser:

Diskussion

Hur skulle en PI-regulator bete sig i en motsvarande situation med varierande dödtid? Vad händer, om man väljer för liten prediktionshorisont k?

6. FRAMKOPPLING

Framkoppling är känslig för modellfel. Om regulatorn kan adaptera framkopplingsparametrarna så har man bättre möjligheter att få den att fungera tillfredsställande.

Tankprocessen kopplas till IBM-PC AT:s AD-omvandlare enligt följande:

AD 0: u_c Referensvärde

AD 1:	y	Tank 2
AD 2:	v	Tank 1; Framkopplingssignal
DA 0:	u	Styrsignal till pump
Jord	0	Jord

I uppgiften skall vi testa hur pass mycket framkoppling från mätsignalen v kan reducera reglerfelet. Överföringsfunktionen mellan v och nivån i tank 2 dvs processens utsignal motsvarar ungefär ett långsamt lågpassfilter.

Försök först att bedöma vilken regulatorkomplexitet som kan vara en god ansats. Prova adaptering utan framkoppling, lagra undan parametrarna med "SAVE" och inför därefter framkoppling.

Slutsatser:

1. APPENDIX

Programmet för den rekursiva identifieringen exekveras på en IBM-PC AT. Den exekverbara filen kallas ADAPTOR.LOD och kan hämtas in via diskett placerad i diskettläsaren. Datorn startas via huvudströmbrytare på höger sida. Bildskärmen har en särskild strömbrytare på sin frontpanel. Programmet startas med kommandot:

C:\ >ADAPTOR

och svarar strax med en pil '– >'. En tablå med regulatorns status erhålles genom att trycka på tangentbordets "return".

```
=========================================================
ADAPTIVE REGULATOR
---------------------------------------------------------
Regulator Mode: STOP
                                          tsamp = 1.000
Estim = FALSE          Integ= TRUE        ulow  = 0.000
Tune = FALSE           FF    = FALSE      uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nT = 1     T =    0.0000    0.0000
 nV = -1     V =


Estimator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nV = -1    V =
 nF = 2     F =    1.0000   -1.0000 0.2100
 nA0= 1     A0=    1.0000   -0.7000
 nAm= 1     Am=    1.0000   -0.3000

 k = 1   Lambda =    0.9900

---------------------------------------------------------
```

Programmets parametrar kan nu ändras via tangentbordet med ett antal kommandon, som finns närmare beskrivna nedan. Följande exempel visar en möjlig följd av kommandon.

Exempel 1

Betrakta kommandosekvensen

```
->nS 1
->S 2.0 1.0
->k 2
->tsamp 3
->run
->estim TRUE
```

Denna sekvens inleds med att gradtalet på polynomet $S(q^{-1})$ sätts lika med ett. Därefter ges koefficienterna i polynomet S sina värden 2.0 och 1.0. I den tredje satsen ändras prediktionshorisonten k till två steg varefter samplingsintervallet TSAMP sättes till 3 sekunder. Med kommandot RUN startas den digitala regulatorn och med ESTIM T körs slutligen parameterskattningen igång.

Om man begär

```
->indire
```

så erhålles följande alternativa tablå

```
==========================================================
RECURSIVE LEAST SQUARES IDENTIFICATION
----------------------------------------------------------
Regulatormode: Stop                    tsamp = 1.000
Estim = false       Diff = false       ulow  = 0.000
Tune  = false       Ff   = false       uhigh = 1.000

Regulator
 nR = 0     R =    1.0000
 nS = 0     S =    1.0000
 nT = 1     T =    0.0000   0.0000
 nV = -1     V =


Estimator
 nA = 1     A =    1.0000   0.0000
 nB = 0     B =    0.0000
 nC = -1     C =

 nF = 0     F =    1.0000
 k = 1      Lambda =    0.9900

----------------------------------------------------------
```

Nedan följer en översikt över tillgängliga kommandon

RUN	Start av regulatorn
MANUAL	Manuell reglering med $u := u_c$
STOP	Regulator, parameterskattning stänges av
EXIT	Regulator stänges av; Exekvering avbrytes; Återvänder till DOS
ESTIM 1	Parameterskattning påbörjas/avbrytes
TUNE 1	Regulatortrimning påbörjas/avbrytes
DIFF 1	Differensbildning av data i skattningsalgoritmen till/från
INTEG 1	Integralverkan i adaptiva regulatorn till/från
FF 1	Framkoppling till/från
TSAMP r	Samplingsperiod i sekunder
ULOW r	Undre begränsning för styrsignalen u
UHIGH r	Övre begränsning för styrsignalen u
RO r	Koefficient för styrsignalviktning enligt Clark-Gawthrop

DIRECT l	Direkt adaptiv reglering till/från
INDIRE l	Indirekt adaptiv reglering till/från
CLARKG l	Clark-Gawthrop viktning till/från
NR i	Regulatorpolynomet R:s gradtal
NS i	Regulatorpolynomet S:s gradtal
NT i	Regulatorpolynomet T:s gradtal
NV i	Regulatorpolynomet V:s gradtal
R p	Regulatorpolynomet R sättes till värdet p
S p	Regulatorpolynomet S sättes till värdet p
T p	Regulatorpolynomet T sättes till värdet p
V p	Regulatorpolynomet V sättes till värdet p
NA i	Modellpolynomet A:s gradtal
NB i	Modellpolynomet B:s gradtal
NC i	Modellpolynomet C:s gradtal
NF i	Filterpolynomet F:s gradtal
NA0 i	Observatörspolynomet A0:s gradtal
NAm i	Referensmodellens polpolynom Am:s gradtal
A p	Modellpolynomet A sättes till värdet p
B p	Modellpolynomet B sättes till värdet p
C p	Modellpolynomet C sättes till värdet p
F p	Filterpolynomet F sättes till värdet p
A0 p	Observatörspolynomet A0 sättes till värdet p
Am p	Referensmodellens polpolynom Am sättes till värdet p
K i	Prediktionshorisont; Antal samplingsperioder
LAMBDA r	Glömskefaktor i intervallet (0,1)
SHOW	Parameterstatus visas
BACKUP	Reservregulatorns parameterstatus visas
LOAD	Reservregulatorn/estimatorn aktiveras
SAVE	Den aktiva regulatorn/estimatorn kopieras och sparas
SHOW SIG	Signaler u, y, uc, v visas m.a.p tiden
SHOW A	Skattade parametrar i A-polynomet visas
SHOW B	Skattade parametrar i B-polynomet visas
SHOW C	Skattade parametrar i C-polynomet visas
P	P-matrisen redovisas
P0 r	P-matrisens initialvärde sättes
EQUIL	Jämviktsnivåer läses in
EQUIL0	Jämviktsnivåer nollställes
AMP r	Amplitud för intern referensvärdeskälla läses in
PER r	Periodtid [s] för intern fyrkantvåg läses
MEAN r	Medelvärde för intern signalgenerator läses in

DELAY i	Intern fördröjning av styrsignal; Antal samplingsperioder
FILTER l	Lågpassfiltrering/Högpassfiltrering
EXTREF l	Referensvärde tages via AD-omvandlare 0
INTREF l	Internt referensvärde slages till/från

där

r	reellt tal t.ex. 0.99
i	heltal t.ex. 5
p	polynomkoefficienter t.ex. 0.5 1.5
l	logisk variabel dvs. T (true) eller F (false)