CODEN:LUTFD2/(TFRT-5315)/1-058/(1984)

REGLERING AV SYSTEM MED VARIABEL TIDSFÖRDRÖJNING

ULF PERSSON

DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL
LUND INSTITIUTE OF TECHNOLOGY

NOVEMBER 1984

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL
Box 725
S 220 07 Lund 7 Sweden

Document name
Master thesis
Date of issue
November
Document number
CODEN:LUTFD2/(TFRT-5315)/1-058/(1984)

Author(s)
Ulf Persson

Supervisor
Björn Wittenmark

Sponsoring organization

Title and subtitle
Reglering av system med variabel tidsfördröjning.
(Control of systems with timevarying timedelay.)

Abstract

A method for control of systems with timevarying time delay is investigated.
The control algoritm can be viewed as minimizing the expected variance of an auxillary signal which is a function of the system output, input and reference signal.
The auxillary signal is defined in such a way that the auxillary-system time delay are less or equal to the system time delay.
The parameters in the control law are estimated by the method recursive least-squares from the auxillary signal.
The only needed knowledge of the process is the order of the process polynomials and the maximum time delay.
The method is investigated using simulation with the interactive simulation program package SIMNON.
It is shown that the controller can adapt to changes in the time delay.

Key words

Classification system and/or index terms (if any)

Supplementary bibliographical information

ISSN and key title

ISBN

Language
Swedish
Number of pages
58

Recipient's notes

Security classification

Distribution: The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

Dokumentutgivare

Handläggare BW

Författare Ulf Persson

Dokumentnamn

Utgivningsdatum

Dokumentbeteckning

Ärendebeteckning

Dokumenttitel och undertitel

55 (Eng)

Reglering av system med variabel tidsfördröjning

(Control of systems with timevarying timedelay)

Referat (sammandrag)

A method for control of systems with timevarying time delay is investigated.
The control algoritm can be viewed as minimizing the expected variance of an auxillary signal which is a function of the system output, input and reference signal.
The auxillary signal is defined in such a way that the auxillary-system time delay are less or equel to the system time delay.
The parameters in the control law are estimated by the method recursive least-squares from the auxillary signal.
The only needed knowledge of the process is the order of the process polynomials and the maximum time delay.
The method is investigated using simulation with the interactive simulation program package SIMNON.
It is shown that the controller can adapt to changes in the time delay.

Referat skrivet av Author

Förslag till ytterligare nyckelord

Klassifikationssystem och -klass(er)

Indextermer (ange källa)

Omfång 58 sidor

Övriga bibliografiska uppgifter 15672

Språk Swedish

Sekretessuppgifter

ISSN 16014

ISBN

Dokumentet kan erhållas från

Mottagarens uppgifter 16274

Pris

Blankett LU 11:25 1976–07

DOKUMENTDATABLAD enligt SIS 62 10 12

REGLERING AV SYSTEM MED VARIABEL TIDSFÖRDRÖJNING

Examensarbete i Reglerteknik
Oktober 1984

Författare: Ulf Persson
Handledare: Björn Wittenmark

INNEHALLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING

Detta arbete avser att undersöka en metod, som beskrivs i (Allidina 1982), för styrning av system med variabel tidsfördröjning. Metoden baserar sig på den i (Clarke,Gawthrop 1979) beskrivna generaliserade minimalvariansregleringen. Simuleringarna i detta examensarbete är ämnade att jämföras med de som gjorts av (Palmgren 1982).

Förutsättningen är att man kan fixera det maximala värdet på processens totala tidsfördröjning. Tidsfördröjningen får för övrigt vara variabel, både diskret och kontinuerligt. I detta examensarbete har enbart simuleringar med diskret varierande tidsfördröjning gjorts.

Exempel på processer med variabel tidsfördröjning är de där produktionen beror på något flöde. Ett fall är en pappersmaskin, där tjockleken på papperet mätes på ett ställe och påverkas på ett annat. Kopplingen mellan utsignalen (tjockleken) och styrsignalen (massaflöde) rymmer en variabel tidsfördröjning eftersom papperet transporteras och tillverkas med olika hastighet.

Kapitlet Processen är en kortfattad beskrivning av processmodellen.
I kapitlet Reglering beskrivs den metod som utnyttjats för att beräkna parametrarna i styrlagen. Vidare beskrivs regleringsalgoritmen.

Den här använda metoden är lika bra som den i (Palmgren 1982) använda. Systemets utsignal följer referenssignalen ungefär lika bra i de båda metoderna, både beträffande stegsvar och översläng.

Det av Institutionen för Reglerteknik vid Lunds Tekniska Högskola utvecklade simuleringsspråket Simnon finns beskrivet i (Elmqvist 1975).

Teori för samplade system, härledning av minsta-kvadrat-metoden och här förekommande nomenklatur återfinns i (Gustavsson 1978) och (Åström,Wittenmark 1982).

Appendix A innehåller programlistor på program som används för de olika simuleringarna.
Appendix B innehåller en beräkning som visar hur polerna ändras då tidsfördröjningen varierar i systemet.

2. PROCESSEN

Processen ges av differensekvationen, se (Allidina 1982),

$$A\,y(t) = q^{-k}\,B\,u(t) + C\,\xi(t) \qquad (2.1)$$

där y(t) och u(t) är processens utsignal respektive styrsignal.
$\xi(t)$ är brus.

$A = a_0 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \ldots + a_{na}q^{-na}$

$B = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \ldots + b_{nb}q^{-nb}$

$C = c_0 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \ldots + c_{nc}q^{-nc}$

k = systemts totala tidsfördröjning uttryckt i samplingsintervall

t = samplingstidpunkterna

För detta examensarbete gäller att

$A = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}$

$B = b_0 + b_1q^{-1}$

$C = c_0 = 1$

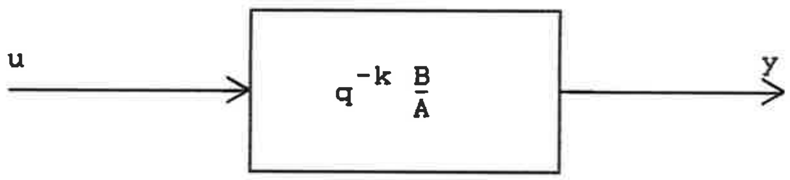
$\xi(t) = 0$

k = diskret varierande tidsfördröjning $(k \geq 1)$

Då får den diskreta överföringsfunktionen $H(q^{-1})$ utseendet

$$H(q^{-1}) = q^{-k}\,\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \qquad (2.2)$$

Se figur 2.1



<u>Figur 2.1</u> Processen. u = styrsignal. y = utsignal.

3. REGLERING

Regleringen är en generaliserad minimalvariansreglering enligt (Clarke,Gawthrop 1979). Men i stället för att minimera variansen hos utsignalen minimeras variansen hos en hjälpsignal Φ. Där hjälpsignalen är en funktion av utsignal, styrsignal och referenssignal.

3.1. Införande av hjälpsignal

Definerar en hjälpsignal, se (Clarke,Gawthrop 1979),

$$\Phi(t) = P\ y(t) + Q\ u(t-\ell) - R\ w(t-\ell) \tag{3.1.1}$$

P, Q och R är kända polynom i q^{-1},

ℓ är ett heltal så att $1 \le \ell \le k$ och

w(t) är referenssignalen som systemet skall följa.

P, Q och R defineras som

$$P = p_0 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} + \ldots + p_{np} q^{-np}$$

$$Q = q_0 + q_1 q^{-1} + q_2 q^{-2} + \ldots + q_{nq} q^{-nq}$$

$$R = r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2} + \ldots + r_{nr} q^{-nr}$$

Detta examensarbete har utförts för $\ell = 1$, dvs med

$$\Phi(t) = P\ y(t) + Q\ u(t-1) - R\ w(t-1) \tag{3.1.2}$$

3.2. Styrlag

Styrlagen ges av, se (Clarke,Gawthrop 1979),

$$H\ u(t) = -\ G\ y(t) - E\ w(t) \tag{3.2.1}$$

där polynomen H, G och E ges av

$$\left.\begin{aligned} H &= QC + q^{-(k-\ell)}\,BL \\ G &= q^{\ell}(PC - AL) \\ E &= -\,CR \end{aligned}\right\} \tag{3.2.2}$$

eller skrivit i skiftoperatorn

$$\left.\begin{aligned} H &= h_0 + h_1 q^{-1} + h_2 q^{-2} + \ldots + h_{nh} q^{-nh} \\ G &= g_0 + g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2} + \ldots + g_{ng} q^{-ng} \\ E &= e_0 + e_1 q^{-1} + e_2 q^{-2} + \ldots + e_{ne} q^{-ne} \\ L &= \ell_0 + \ell_1 q^{-1} + \ell_2 q^{-2} + \ldots + \ell_{n\ell} q^{-n\ell} \end{aligned}\right\} \tag{3.2.3}$$

Ordningstalen för H, G, E, och L är

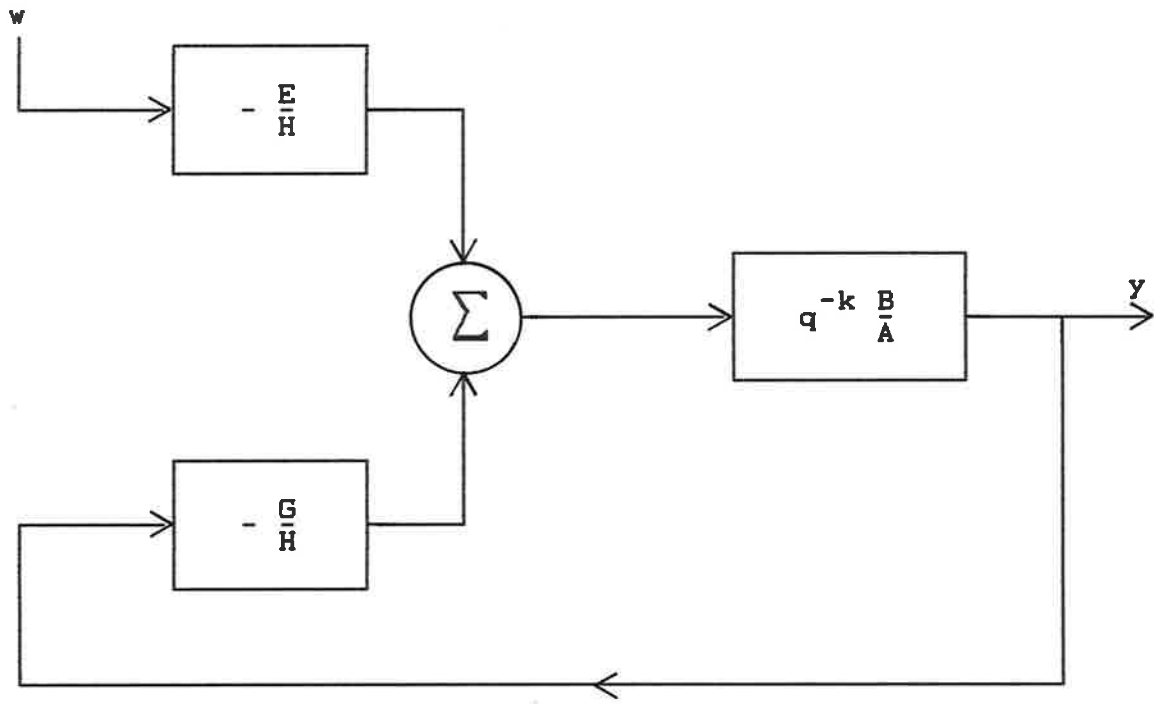
$$\left.\begin{aligned} \deg H &= \max(\, nq + nc \,,\; kmax - 1 + nb \,) \\ \deg G &= \max(\, na - 1 \,,\; np + nc - \ell \,) \\ \deg E &= nc + nr \\ \deg L &= \ell - 1 \end{aligned}\right\} \tag{3.2.4}$$

eller med $\ell=1$

$$\left.\begin{aligned} \deg H &= \max(\, nq + nc \,,\; kmax - 1 + nb \,) \\ \deg G &= \max(\, na - 1 \,,\; np + nc - 1 \,) \\ \deg E &= nc + nr \\ \deg L &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{3.2.5}$$

L = 1 har används.

3.3. Slutna systemet



Figur 3.1 Det slutna systemet.

De slutna systemet ges av

$$y(t) = - \frac{q^{-k}\,BE}{AH + q^{-k}\,BG}\, w(t) \qquad (3.3.1)$$

eller med H, G och E enligt (3.2.2) av

$$y(t) = \frac{q^{-k}\,BR}{AQ + q^{-(k-\ell)}\,BP}\, w(t) \qquad (3.3.2)$$

Ekvation (3.3.2) visar att P och Q påverkar slutna systemets poler och R slutna systemets nollställen.

Med $\ell=1$ blir slutna systemet

$$y(t) = \frac{q^{-k}BR}{AQ + q^{-(k-1)}BP} w(t) \tag{3.3.3}$$

Allidina (1982) föreslog att denna metod kan användas då systemet har variabel tidsfördröjning. Detta förutsätter att tidsfördröjningen k kan fixeras så att den varierar mellan k_{min} och k_{max}. Där k_{min} ska väljas så att $k_{min} \geq \ell$. Här är $\ell=1$, dvs $k_{min} \geq 1$. Värdet på k_{max} behövs bara för att fixera ett lämpligt ordningstal för polynomet H. Om $k<k_{max}$ kommer koefficienterna framför de termer med högst ordningstal i polynomet H att bli noll.

3.4. Val av P, Q och R

P, Q och R ska väljas så att:

De minimerar en förlustfunktion som tar hänsyn till förändringar i systemets insignal och utsignal (Clarke 1975).

Det slutna systemet blir stabilt. Eftersom P, Q och R är fixa kommer det slutna systemets poler och nollställen att ändras när tidsfördröjningen k ändras. I appendix B finns ett räkneexempel som visar detta. Poler och nollställen ges av ekvation (3.3.3).

Den statiska förstärkningen hos det slutna systemet blir ett (1),

dvs $$\frac{B(1)R(1)}{A(1)Q(1) + B(1)P(1)} = 1 .$$

Systemets utsignal följer referenssignalen w så exakt som möjligt.

3.5. Estimering av parametrarna i styrlagen

Parametrarna i styrlagen (3.2.1) estimeras med minsta kvadratmetoden från, se (Allidina 1982),

$$\Phi(t) = H\,u(t-1) + G\,y(t-1) + E\,w(t-1) \tag{3.5.1}$$

$$\theta = [\ h_0\ h_1 \dots h_{nh}\ g_0\ g_1 \dots g_{ng}\ e_0\ e_1 \dots e_{ne}\ ]^T$$

$$\varphi(t) = [\ u(t-1) \dots u(t-nh-1)\ y(t-1) \dots y(t-ng-1)\ w(t-1) \dots w(t-ne-1)\ ]$$

Estimatet ges då av

$$\theta(t+1) = \theta(t) + K(t)[\ \Phi(t+1) - \varphi(t+1)\theta(t)\ ]$$

med

$$K(t) = P(t)\varphi(t+1)^T[\ \lambda + \varphi(t+1)P(t)\varphi(t+1)^T\ ]^{-1}$$

(estimator förstärkning)

$$P(t+1) = [\ I - K(t)\varphi(t+1)\ ]P(t)/\lambda$$

(estimatorfelets varians)

$$0 < \lambda \le 1$$

(glömskefaktor)

Se (Åström,Wittenmark 1982) och (Gustavsson 1975).

Följande algoritm har används för reglering av processen och beräkning av styrlagen (3.2.1), (Allidina 1982).

(1) Bilda Φ med $\lambda = 1$, ekvation (3.1.2)

(2) Estimera parametrarna med minsta kvadratmetoden från

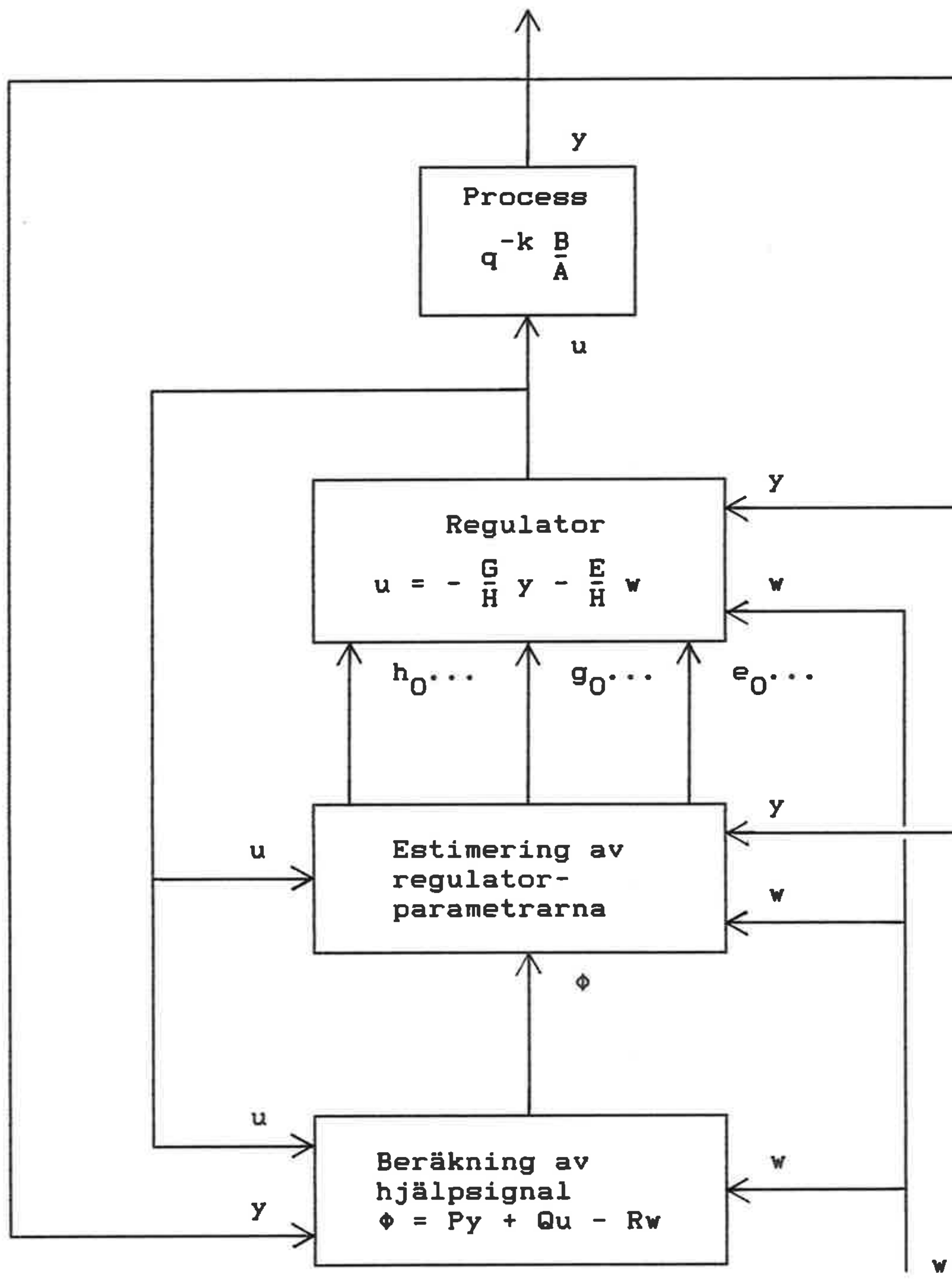
$$\Phi(t) = H\ u(t-1) + G\ y(t-1) + E\ w(t-1)$$

(3) Använd styrlagen

$$H\ u(t) + G\ y(t) + E\ w(t) = 0$$

Se figur 3.2 .

De estimerade parametrarna i H, G och E - polynomen konvergerar då, om de konvergerar, mot de teoretiskt beräknade parametrarna som ges av ekvation (3.2.2) med $\lambda=1$.



Figur 3.2 Reglering.

4. SIMULERINGAR

Följande simuleringar är gjorda på en VAX 11/780 . Simuleringsspråket är Simnon. Simnonprogrammen är listade i appendix A .

Den simulerade processens överföringsfunktion ges av

$$H(q^{-1}) = q^{-k} \frac{b_0 + b_1 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}}$$

i det diskreta fallet. Vilket motsvaras av

$$G(s) = e^{-(k-1)s} \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

i det kontinuerliga fallet.

Simuleringarna har gjorts med

bandbredden $\omega_0 = 0.3$,

dämpningen $\zeta = 0.9$,

och

samplingsperioden $h = 1$.

Detta ger, se (Åström, Wittenmark 1982),

$a_1 = -1.5137$

$a_2 = 0.5827$

$b_0 = 0.03761$

$b_1 = 0.03141$

Simuleringarna är gjorda med den totala tidsfördröjningen k varierande i steg, från 4 till 1 och vice versa. Alla tidsangivelser är givna i antal samplingsintervall. Simuleringarna har gjorts med den diskreta processen och med motsvarande kontinuerliga process.

4.1 Simulering 1 - P, Q och R konstanter

I denna simulering har följande polynom används:

P = 1	L = 1
Q = 1	C = 1
R = 2	

Glömskefaktorn $\lambda = 0.975$ har används.

Totala tidsfördröjningen k varieras enligt figur 4.1a.

Figur 4.1b, 4.1c och 4.1d visar utsignal och referenssignal. En jämförelse med (Palmgren 1982) visar att utsignalens översläng blir större medan stegsvaret blir ungefär samma med den här använda metoden.

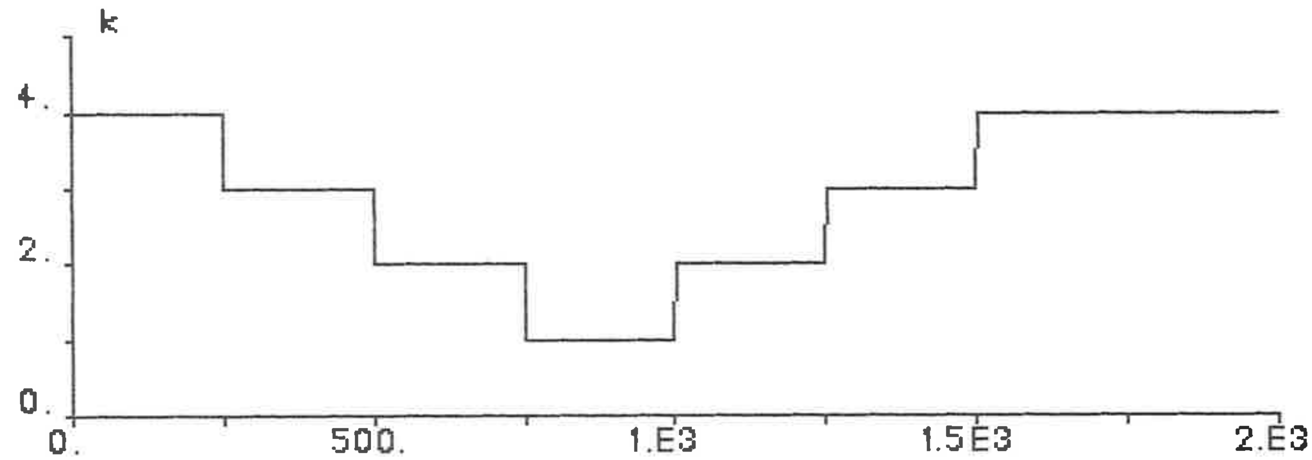
Styrsignalen till processen visas i figur 4.1e.

Figur 4.1f - 4.1m visar de estimerade och de teoretiska koefficienterna i styrlagen (3.2.1), där polynomen ges enligt (3.2.2), (3.2.3) och (3.2.5). De teoretiska koefficienterna har beräknats med formel (3.2.2).

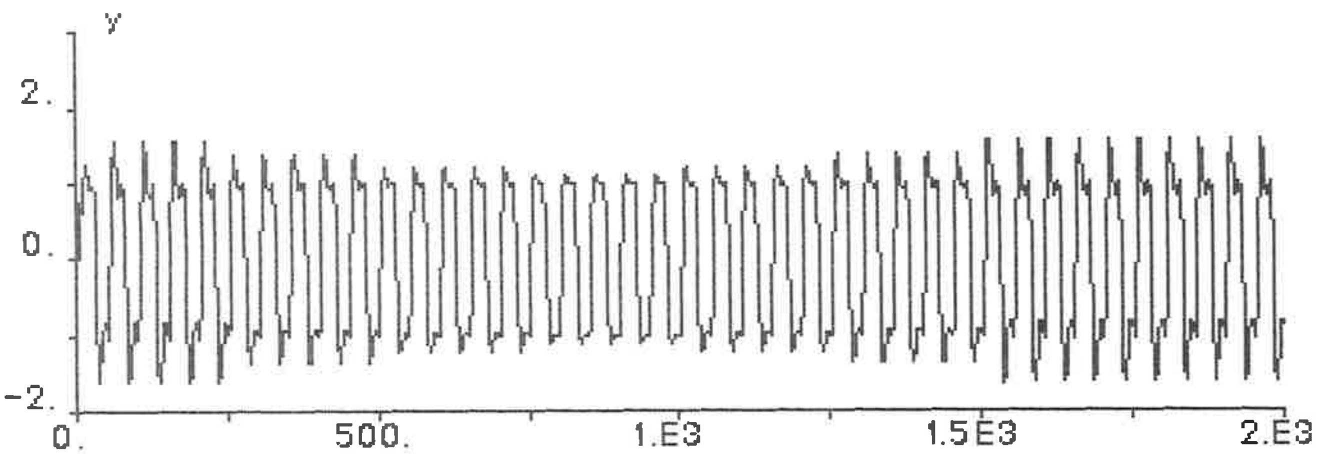
Figur 4.1n och 4.1o visar utsignalen y, då referenssignalens periodtid har ökats från 50 till 100 tidsenheter.
Figur 4.1p och 4.1q visar utsignalen då de teoretiskt beräknade koefficienterna i polynomen H, G och E har används i styrlagen (3.2.1). Jämför 4.1o och 4.1q. Som figurerna visar får utsignalerna samma utseende både då de teoretiska koefficienterna har används direkt i styrlagen och då koefficienterna har estimerats med minsta kvadratmetoden. Figur 4.1q visar att den teoretiska utsignalen inte exakt följer referenssignalen. Detta visar att det inte går att få utsignalen från den här metoden för reglering av system med variabel tidsfördröjning att följa referenssignalen exakt och att det inte går att få utsignalen helt oberoende av tidsfördröjningen i systemet.
En jämförelse mellan 4.1b, 4.1d, 4.1n och 4.1o visar att utsignalens stegsvar blir bättre medan överslången blir ungefär samma då referenssignalen inte ändras för snabbt.
I figur 4.1r och 4.1s visas två koefficienter då referenssignalen har periodtiden 100. Jämfört med figur 4.1h och 4.1i får koefficienterna ungefär samma utseende.

Figur 4.1t visar utsignalen då den kontinuerliga motsvarigheten till den diskreta processen har simulerats. Jämför med figur 4.1b. Samma utseende. Även övriga signaler och koefficienter i det kontinuerliga fallet överensstämmer med motsvarande i det diskreta fallet. Dessa visas ej här.

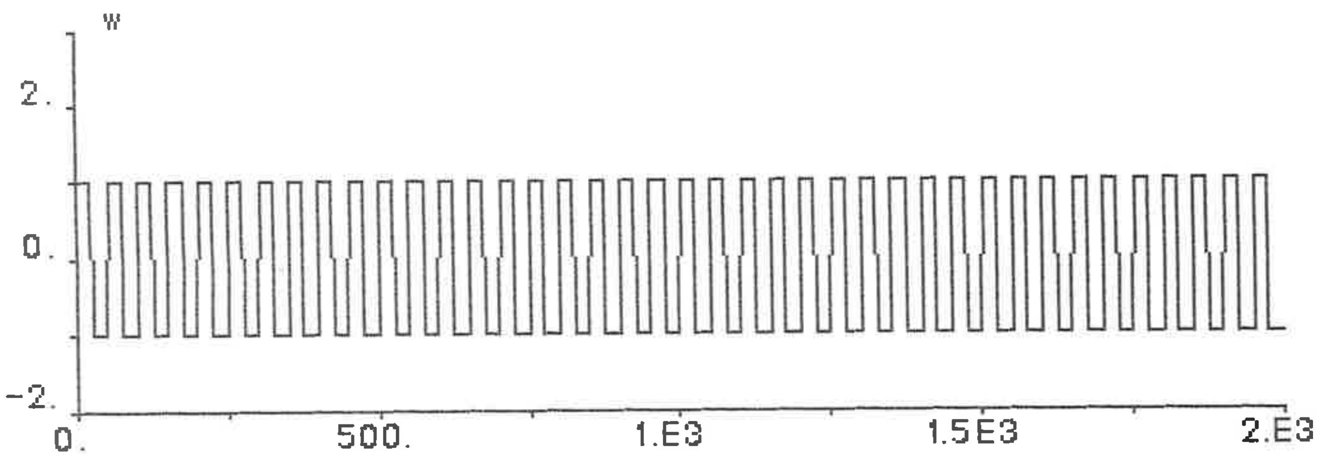
Simulering 1



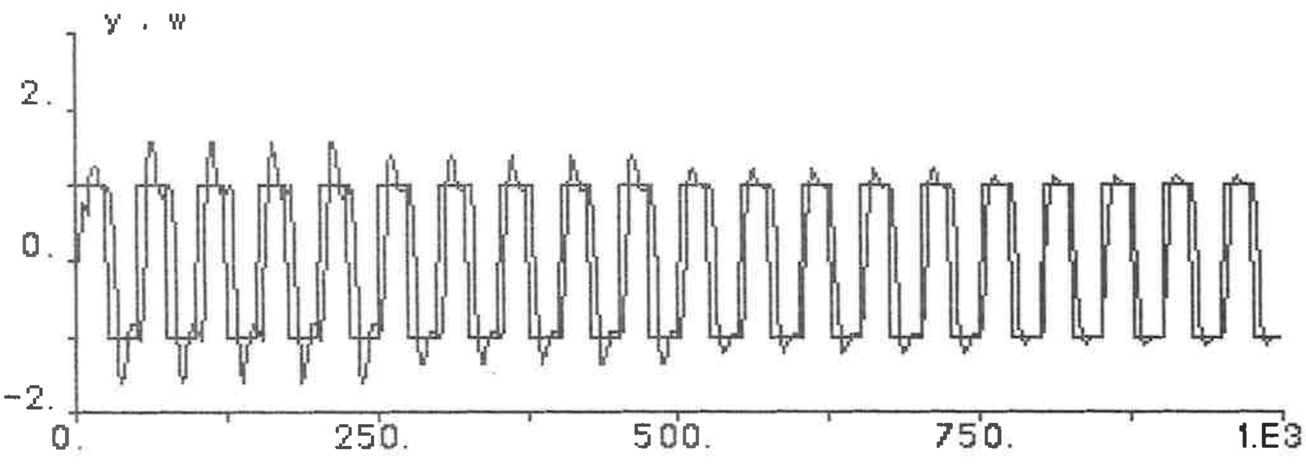
Figur 4.1a Den totala tidsfördröjningens variation i tiden.



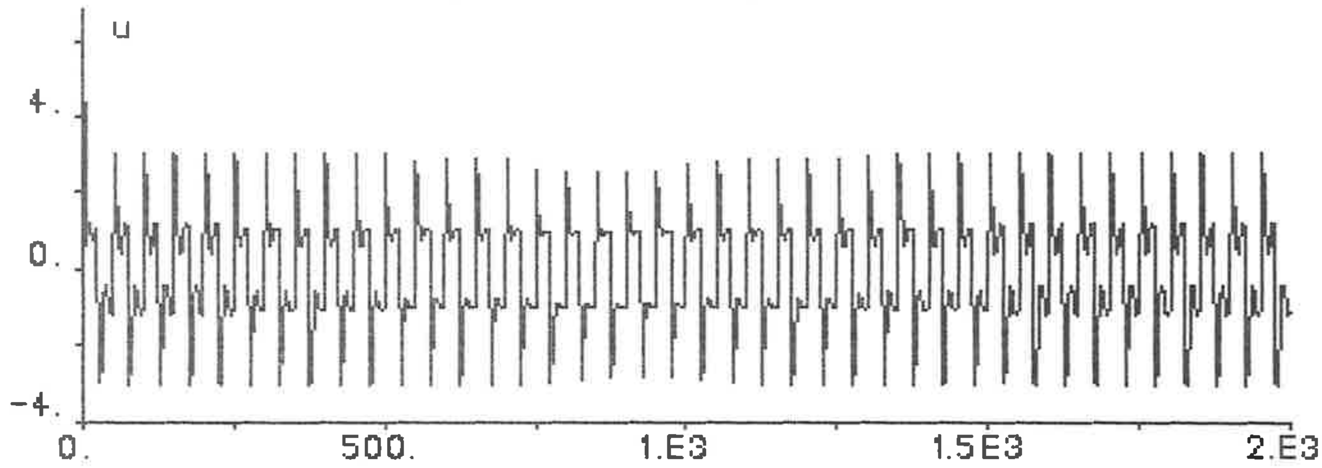
Figur 4.1b Utsignal y. Diskret process.



Figur 4.1c Referenssignal w. Periodtid 50.

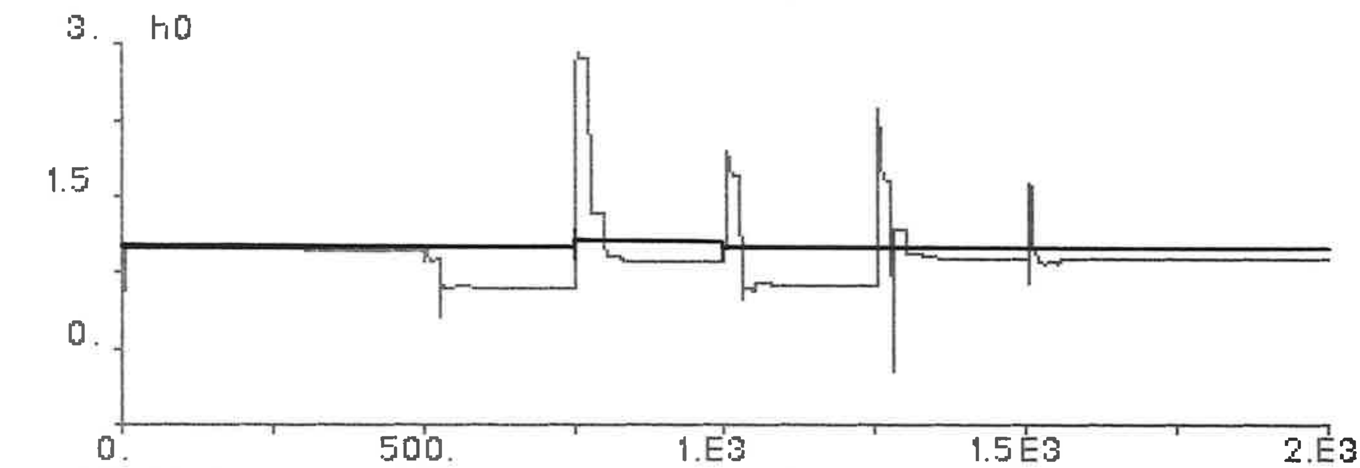


Figur 4.1d Förstoring av utsignal och referenssignal, y och w. Diskret process.

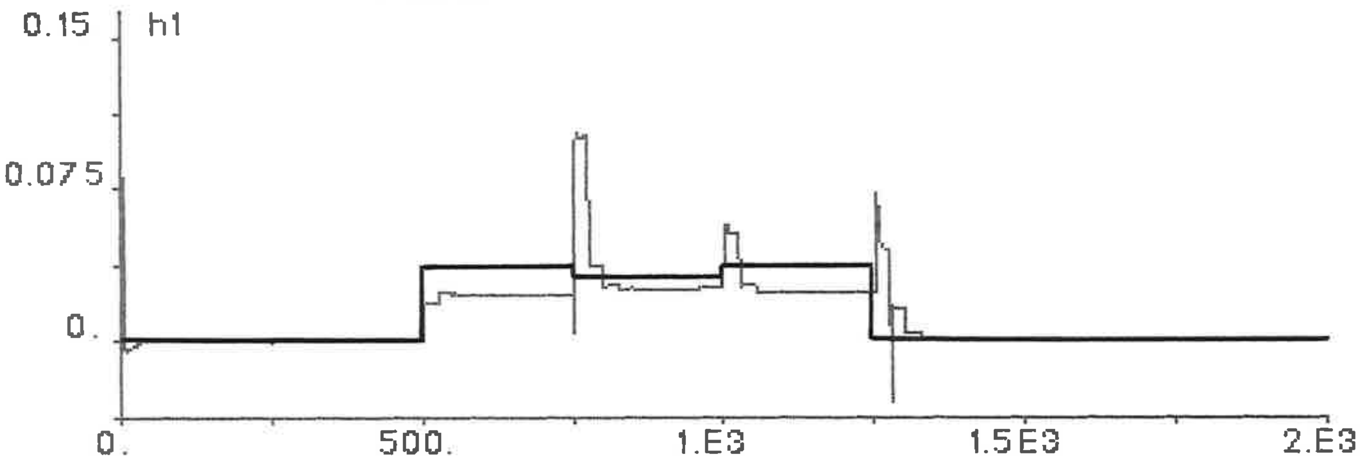


Figur 4.1e Styrsignal till processen. Diskret process.

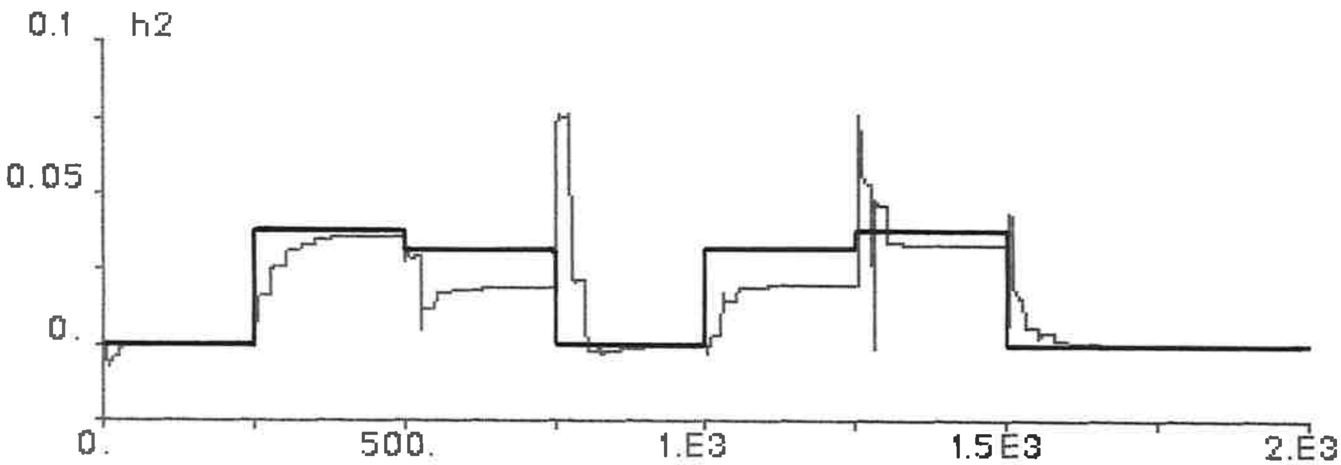
Figur 4.1f - 4.1m visar de estimerade och de teoretiska koefficienterna i H, G och E - polynomen vid simulering med diskret process.



Figur 4.1f h_0

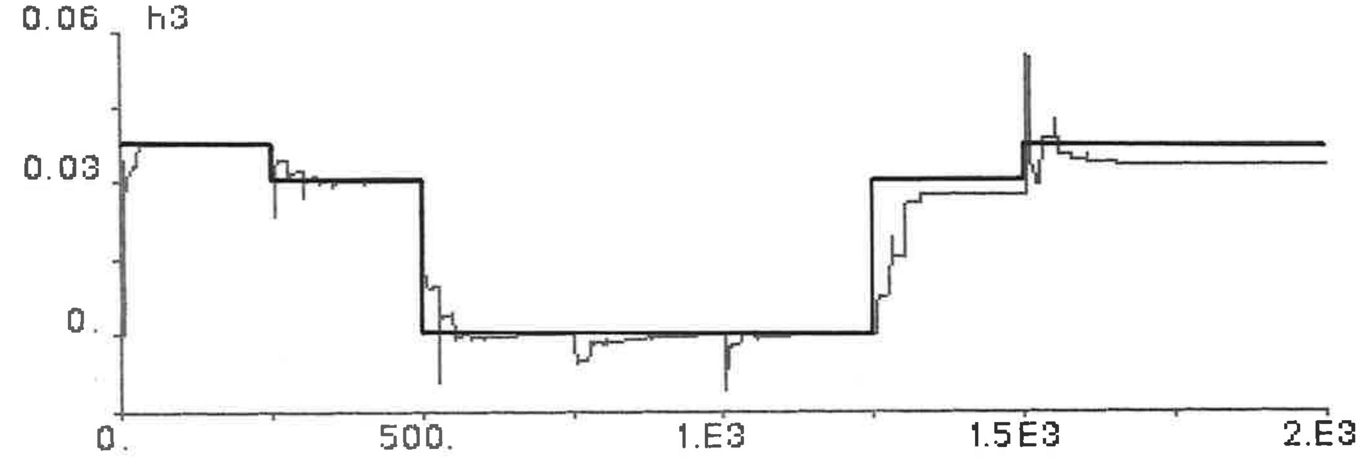


Figur 4.1g h_1

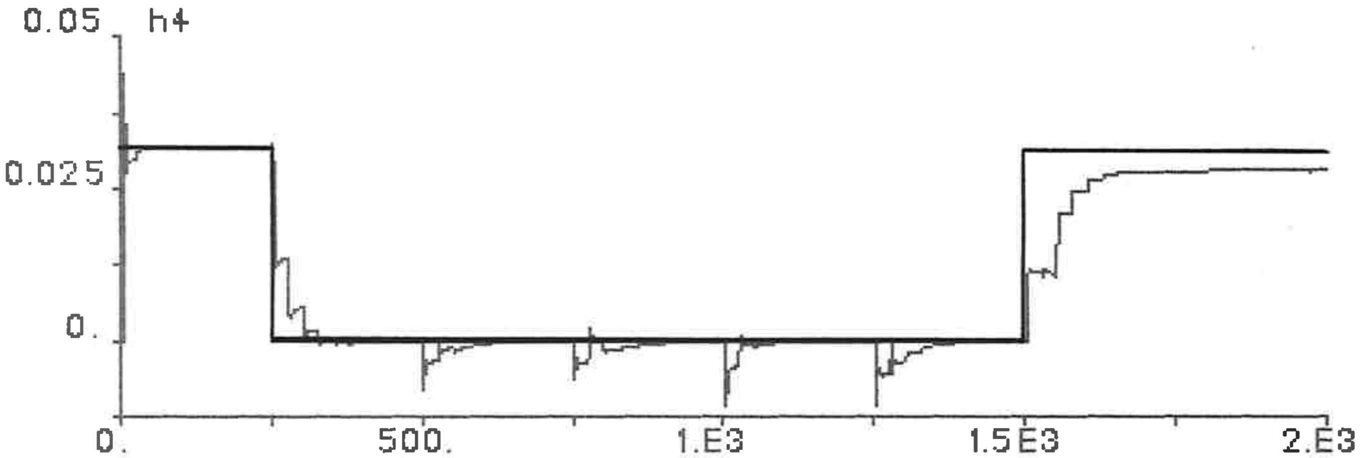


Figur 4.1h h_2

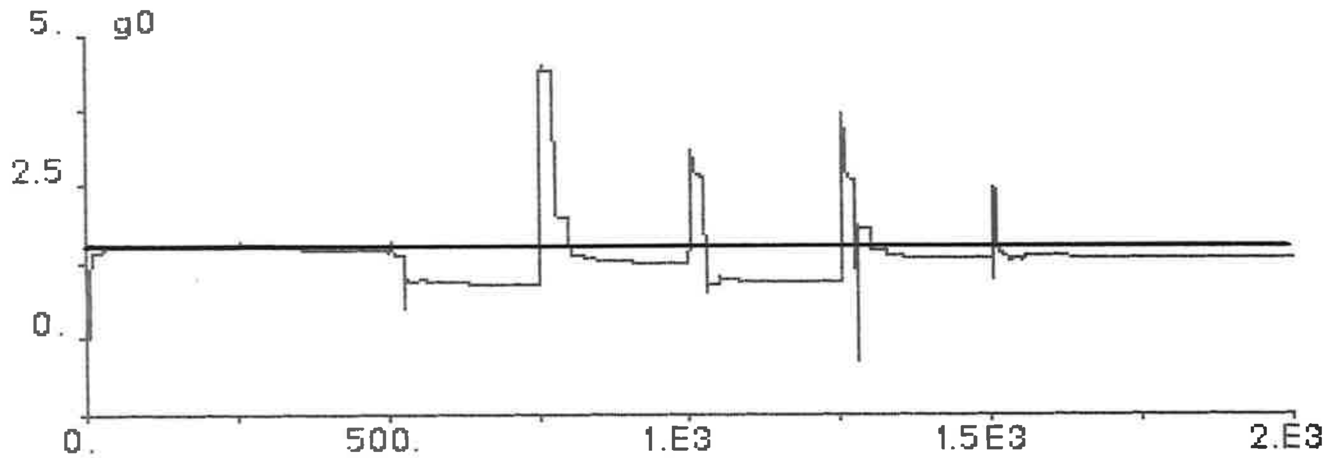
Simulering 1



Figur 4.1i h_3

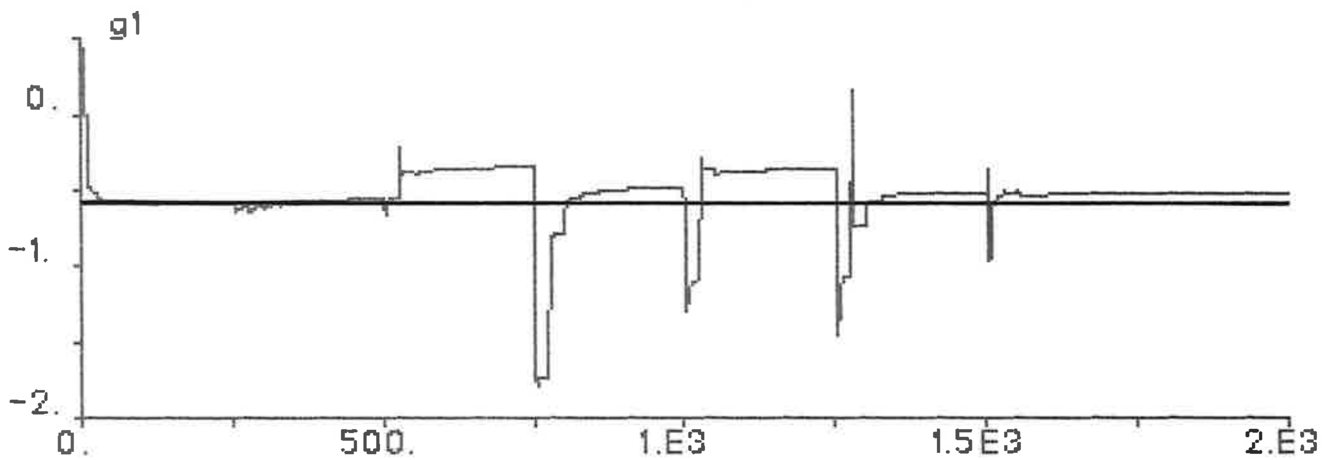


Figur 4.1j h_4

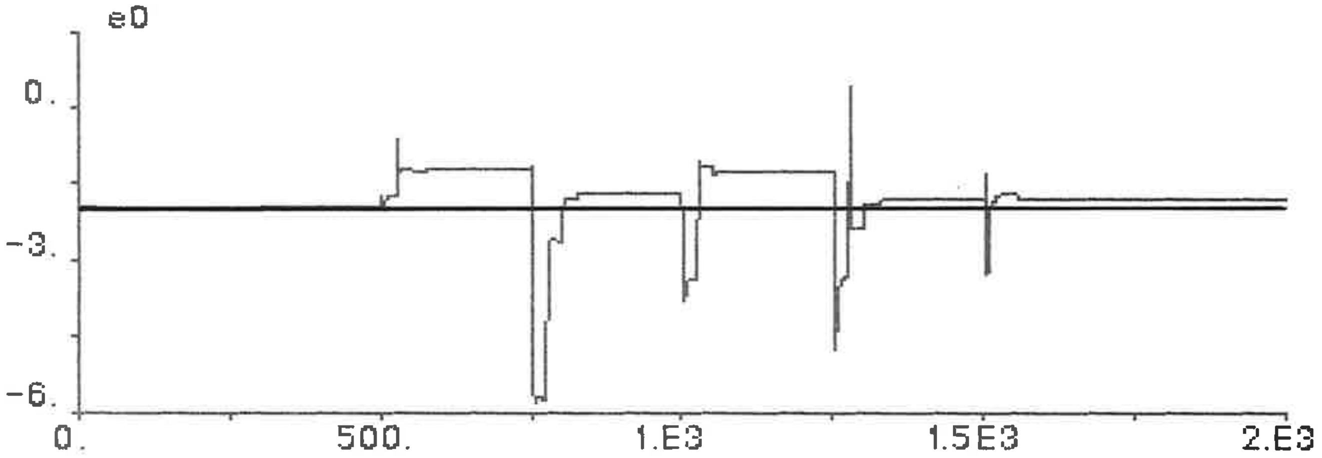


Figur 4.1k g_0

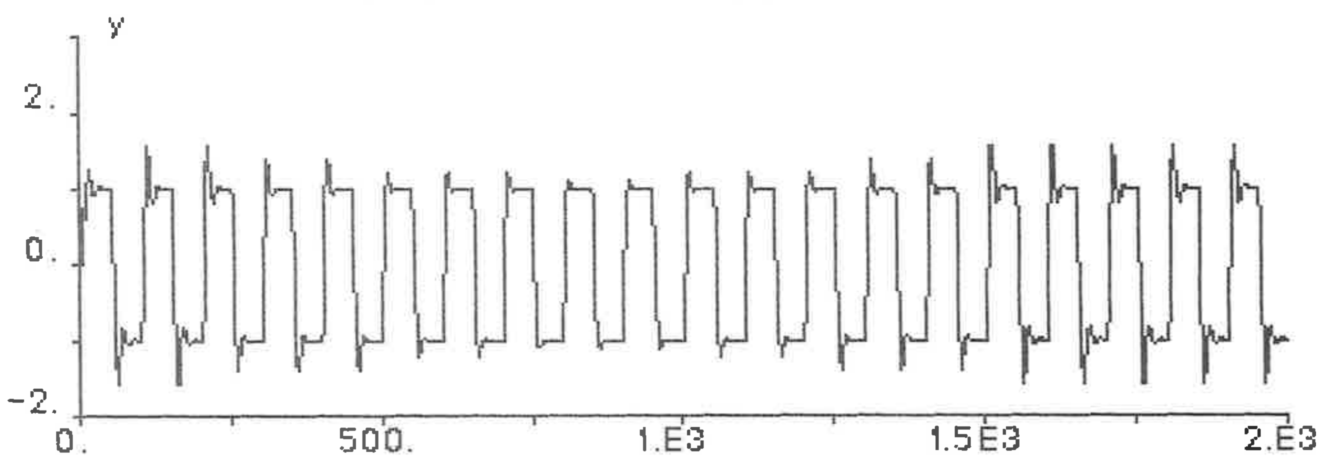
Simulering 1



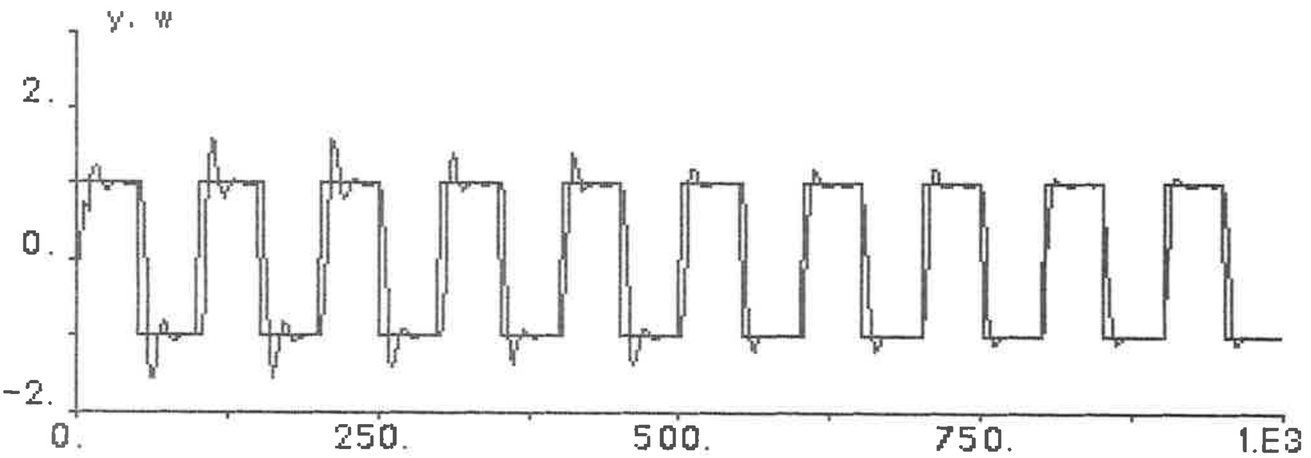
Figur 4.1l g_1



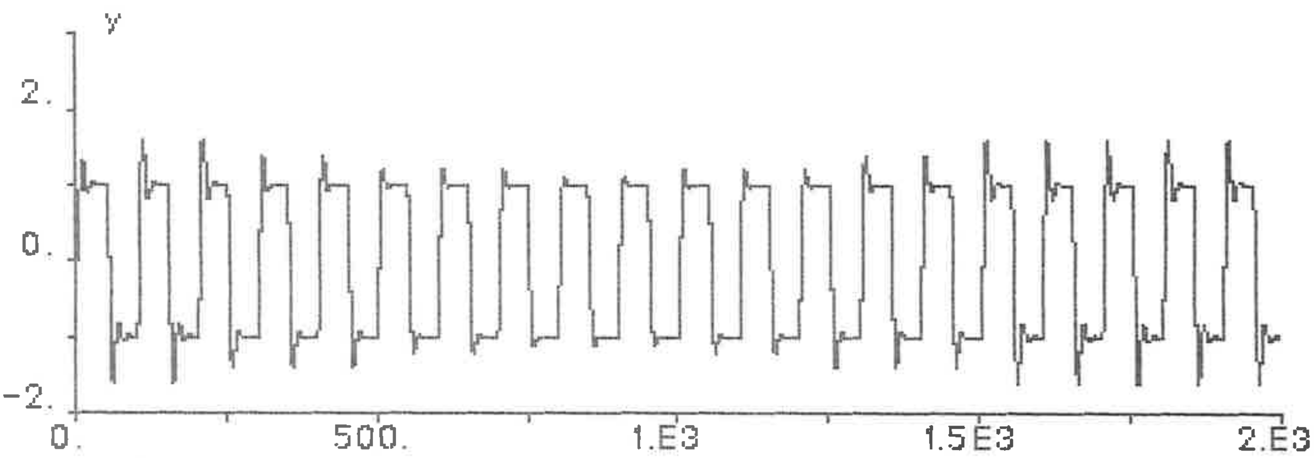
Figur 4.1m e_0



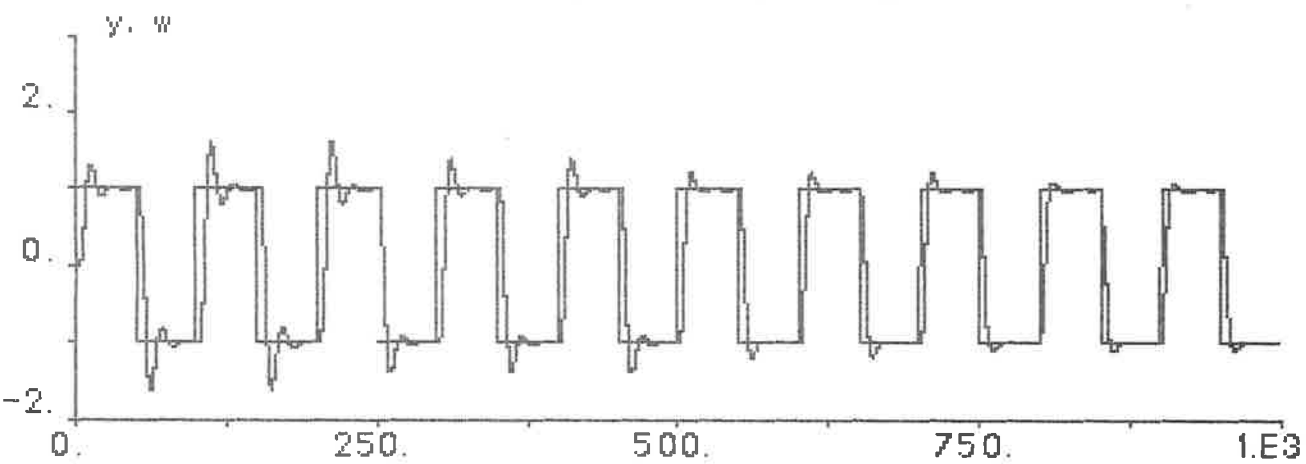
Figur 4.1n Utsignal y. Referenssignalens periodtid 100. Diskret process.



<u>Figur 4.1o</u> **Förstoring av utsignal och referenssignal, y och w. Periodtid 100. Diskret process.**

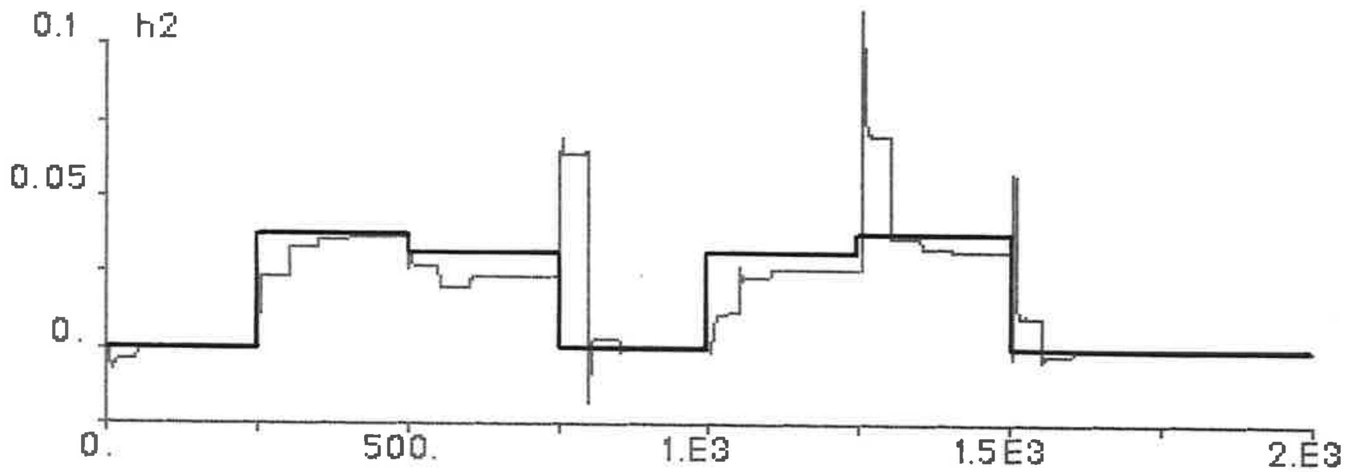


<u>Figur 4.1p</u> **Teoretisk utsignal y. Referenssignalens periodtid 100. Diskret process.**

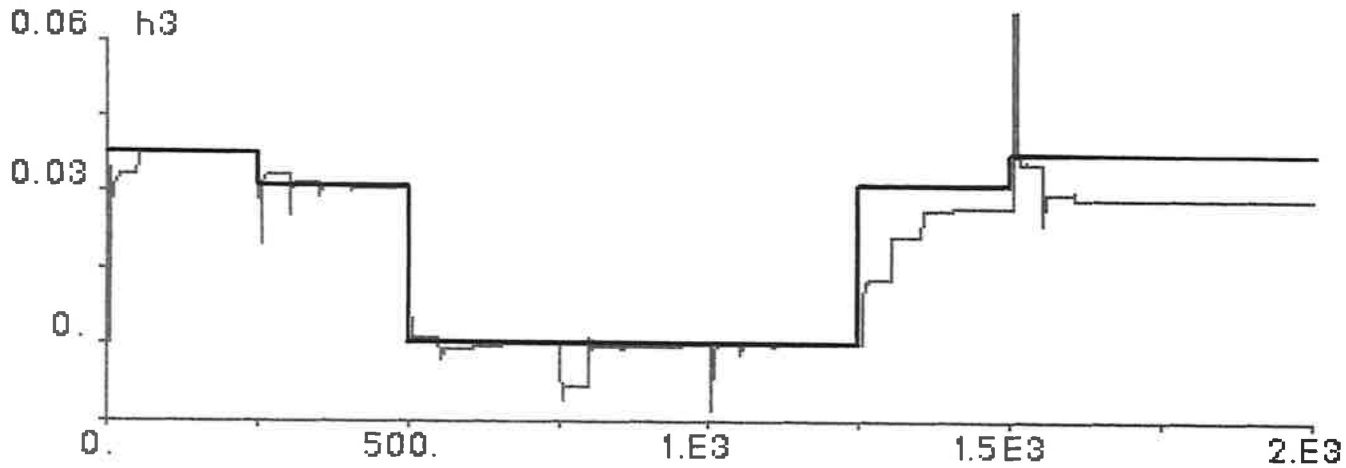


<u>Figur 4.1q</u> **Förstoring av figur 4.1p.**

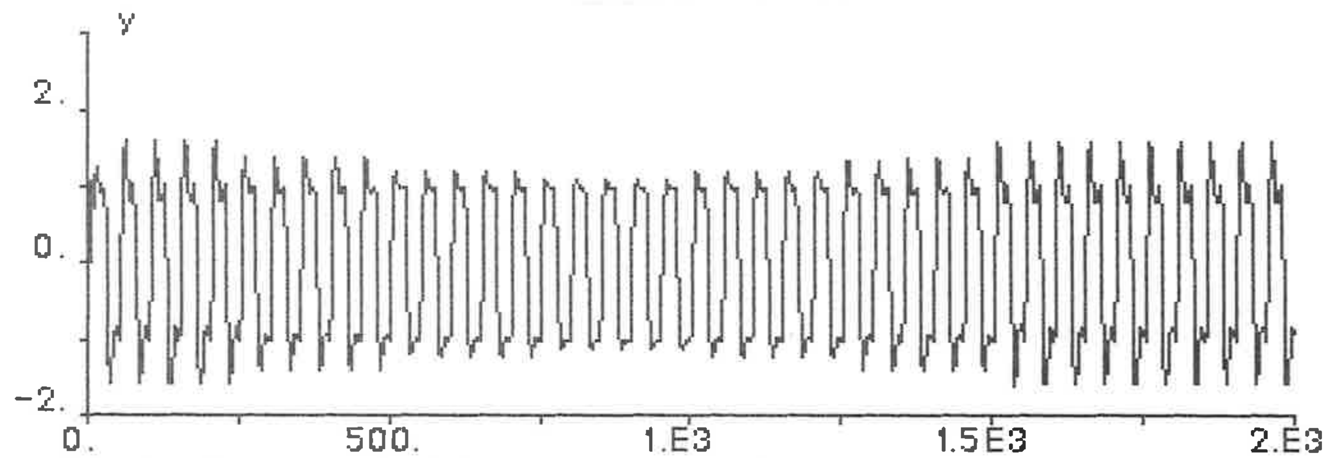
Simulering 1



__Figur 4.1r__ **Koefficienten h2 i H, med referenssignalens periodtid 100. Diskret process.**



__Figur 4.1s__ **Koefficienten h3 i H, med referenssignalens periodtid 100. Diskret process.**



__Figur 4.1t__ **Utsignal y. Kontinuerlig process.**

4.2 Simulering 2 - P, Q och R konstanter - h0 = 1

Samma polynom som i Simulering 1 , avsnitt 4.1, har används.

Glömskefaktorn $\lambda = 0.96$ har används.

Koefficienten h_0 har låsts fast till ett (1), dvs oberoende av processens totala tidsfördröjning.

Detta innebär att (3.5.1) som används vid estimeringen har modifierats till

$$\Phi_{ny}(t) = \Phi(t) - h_0 u(t-1) \tag{4.2.1}$$

där $\Phi(t)$ ges av (3.5.1).

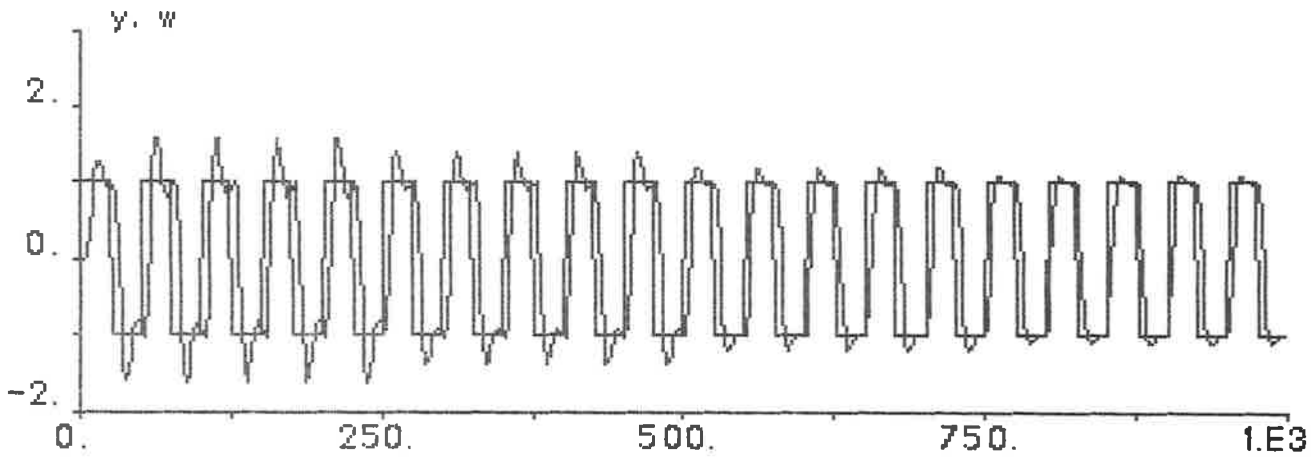
Totala tidsfördröjningen k varieras enligt figur 4.1a.

Figur 4.2a visar utsignal och referenssignal. Utsignalen har samma utseende som i Simulering 1 .

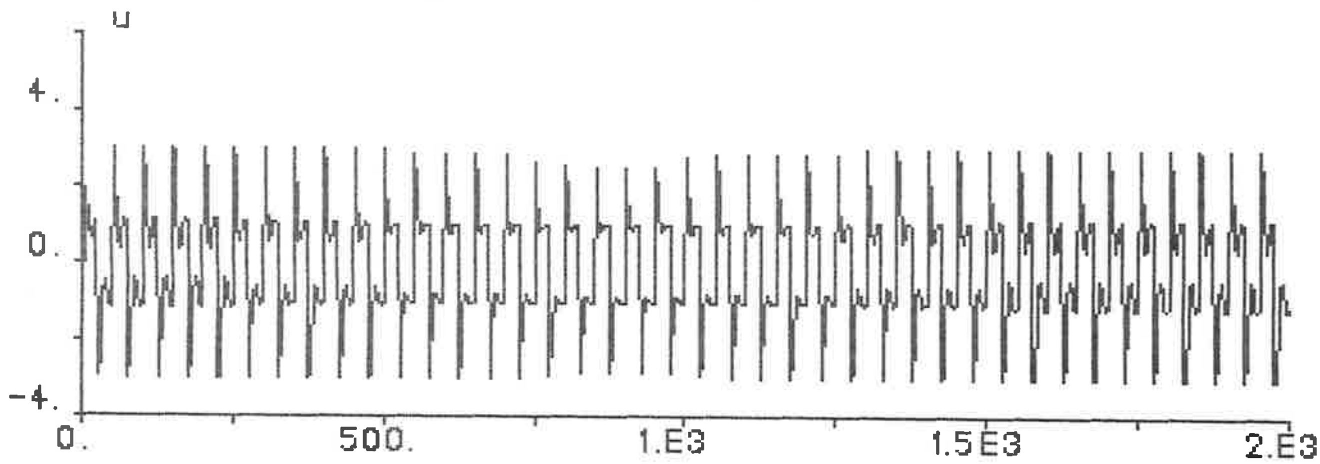
Styrsignalen till processen visas i figur 4.2b.

Figur 4.2c - 4.2i visar de estimerade och de teoretiska koefficienterna i styrlagen (3.2.1). Koefficienterna följer ändringarna i tidsfördröjningen betydligt bättre än i Simulering 1 och i (Palmgren 1982). Koefficienterna antar sina teoretiska värden snabbare.

Simuleringar, vilka ej redovisas, har också gjorts med referenssignalens periodtid 100 tidsenheter. Resultatet av dessa är att utsignalens stegsvar blir bättre. Jämfört med periodtiden 50. Estimeringen av styrlagskoefficienterna blir också något bättre.



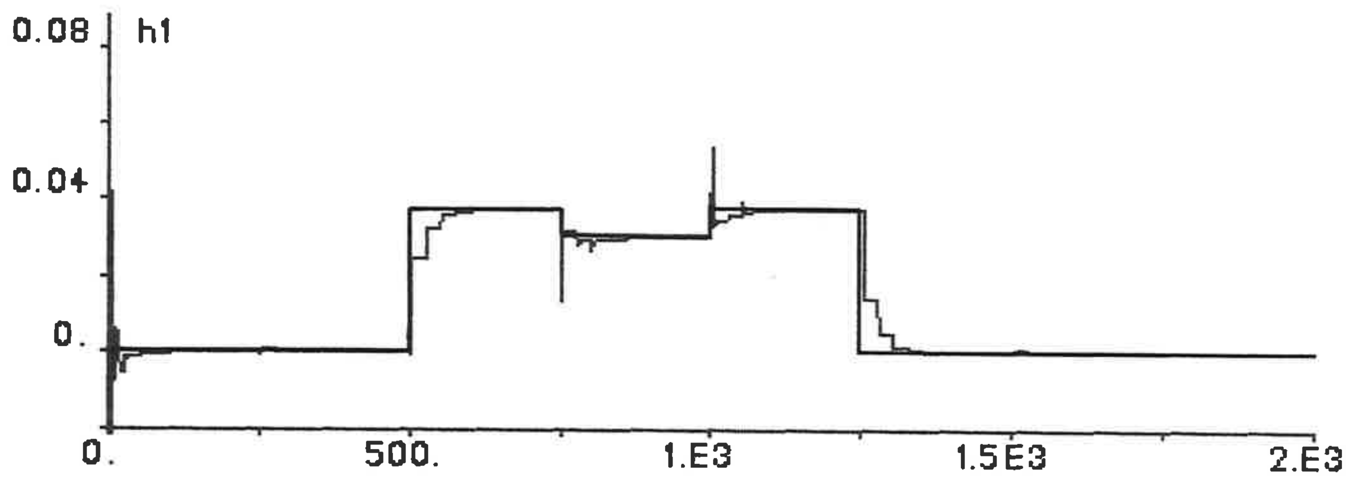
Figur 4.2a Förstoring av utsignal och referenssignal, y och w. Diskret process.



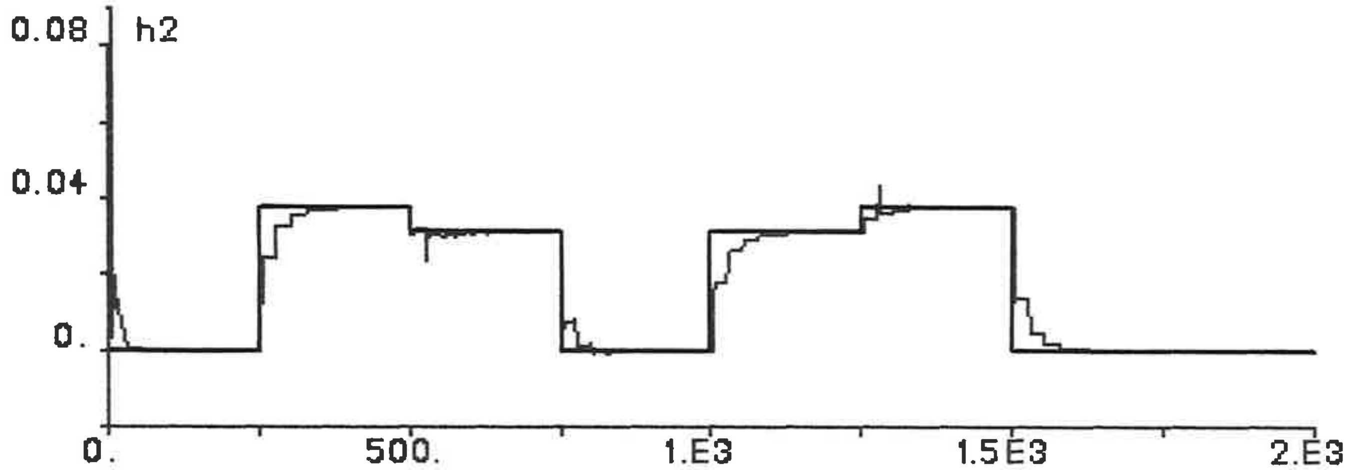
Figur 4.2b Styrsignal till processen. Diskret process.

Figur 4.2c - 4.2i visar de estimerade och de teoretiska koefficienterna i H, G och E - polynomen vid simulering med diskret process.

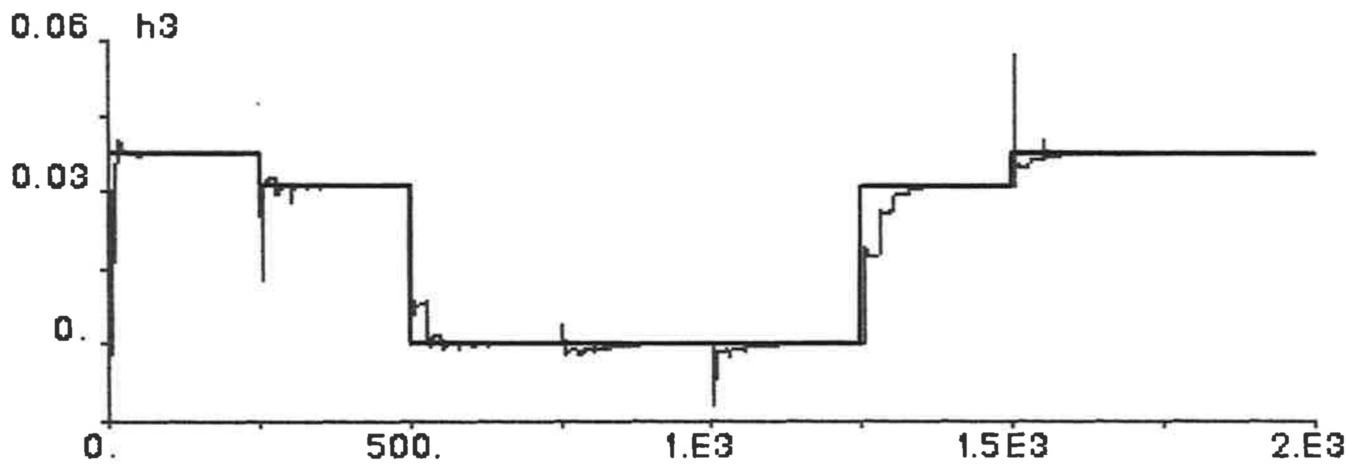
Simulering 2



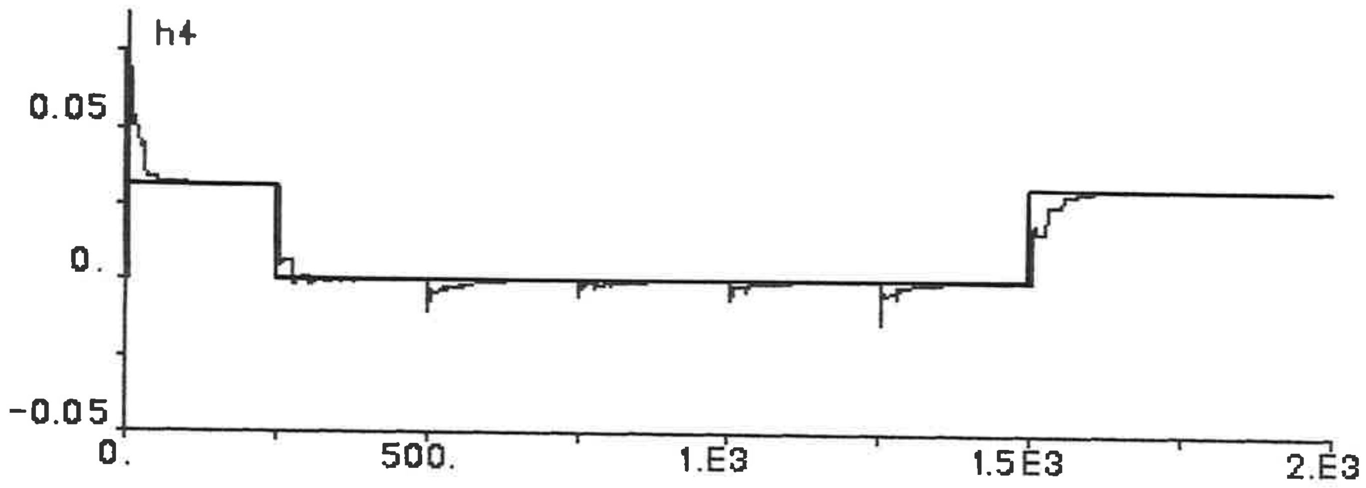
<u>Figur 4.2c</u> h_1



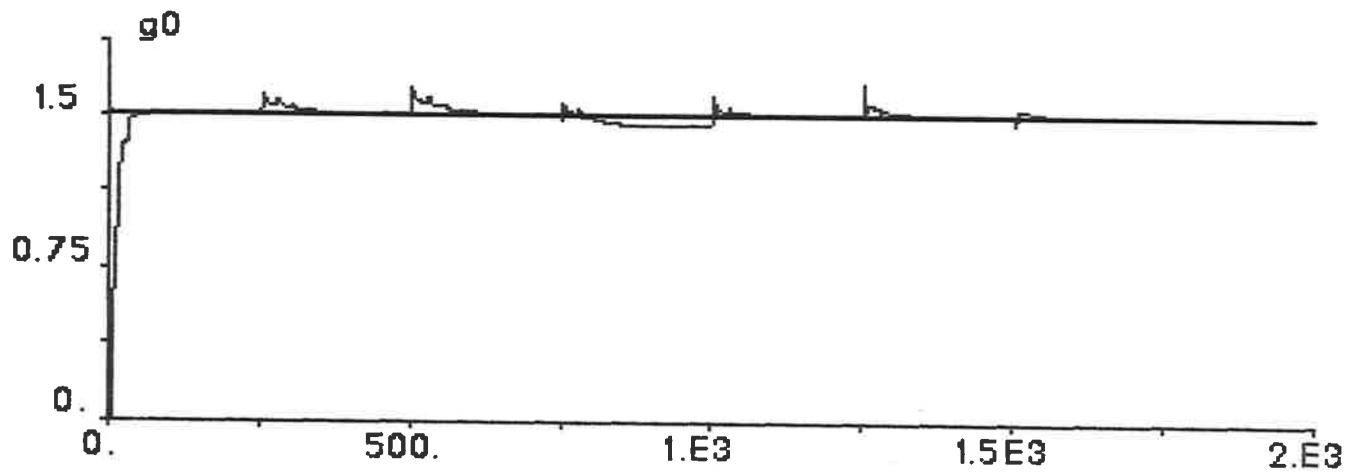
<u>Figur 4.2d</u> h_2



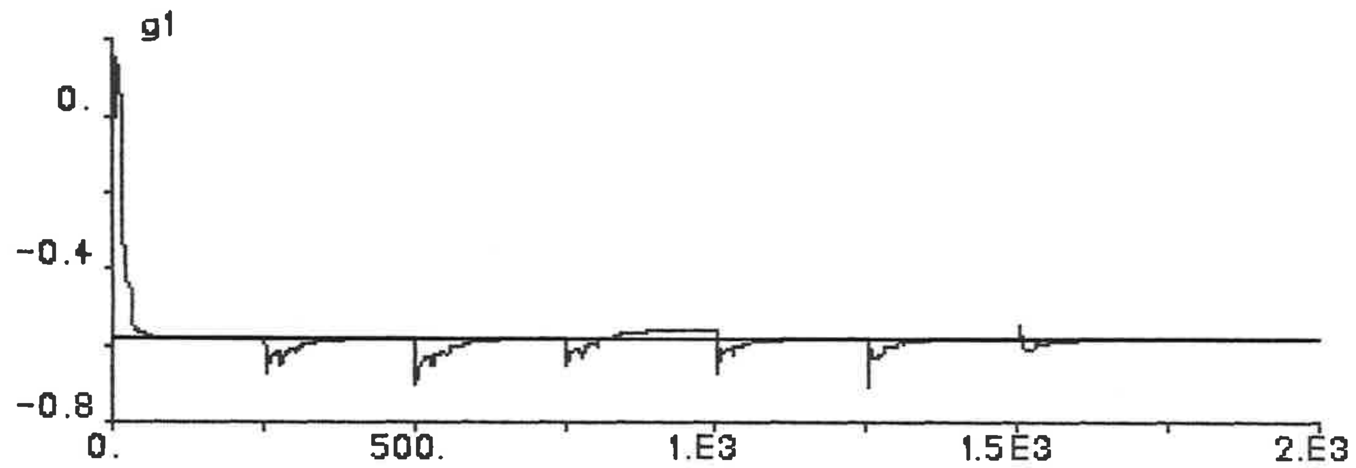
<u>Figur 4.2e</u> h_3



Figur 4.2f h_4

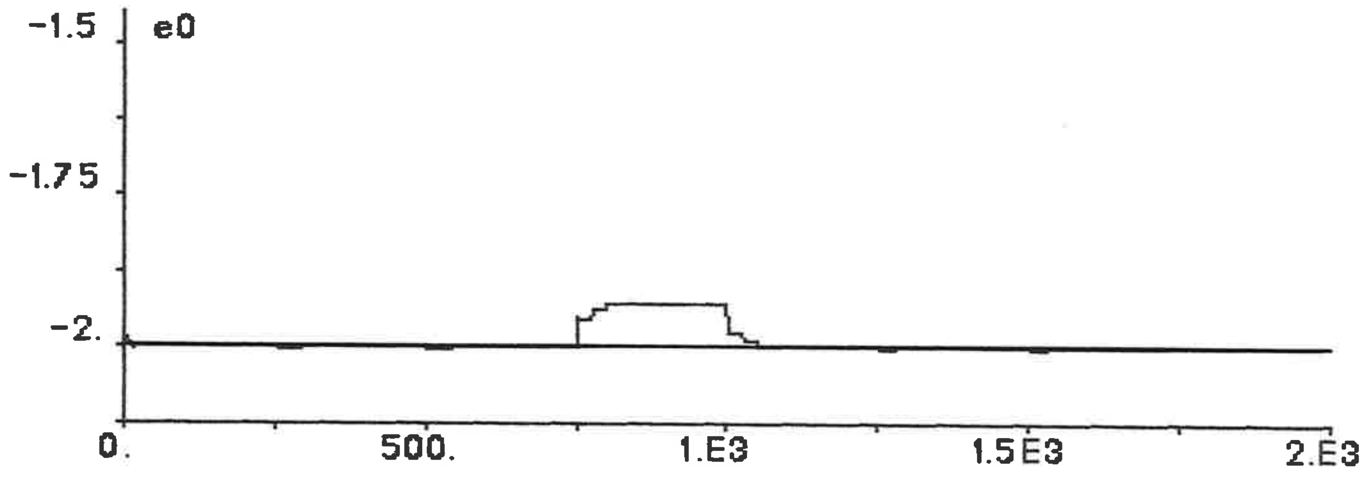


Figur 4.2g g_0



Figur 4.2h g_1

Simulering 2



Figur 4.2i e_0

4.3 Simulering 3 - P, Q och R polynom - h0 = 1

Här har gjorts simuleringar med följande två val av polynomen P, Q och R:

$$\left.\begin{array}{ll} P = 1 - 0.8q^{-1} & L = 1 \\ Q = 1 - q^{-1} & C = 1 \\ R = 0.2 & \end{array}\right\} \quad (4.3.1)$$

och

$$\left.\begin{array}{ll} P = 1 - 0.8q^{-1} & L = 1 \\ Q = 1 - q^{-1} + 0.6q^{-2} & C = 1 \\ R = 0.8 & \end{array}\right\} \quad (4.3.2)$$

Glömskefaktorn har varit $\lambda = 0.96$.

Koefficienten h_0 har låsts fast till ett (1) som i Simulering 2 .

Totala tidsfördröjningen k varieras enligt figur 4.1a.

Figur 4.3a visar utsignal och referenssignal då polynomen (4.3.1) har används. Jämfört med Simulering 1 och Simulering 2 är utsignalens stegsvar långsammare och överslängen mindre. Jämför figur 4.3a med figurerna 4.1d och 4.2a.
Figur 4.3b visar styrsignalen då polynomen (4.3.1) har används.

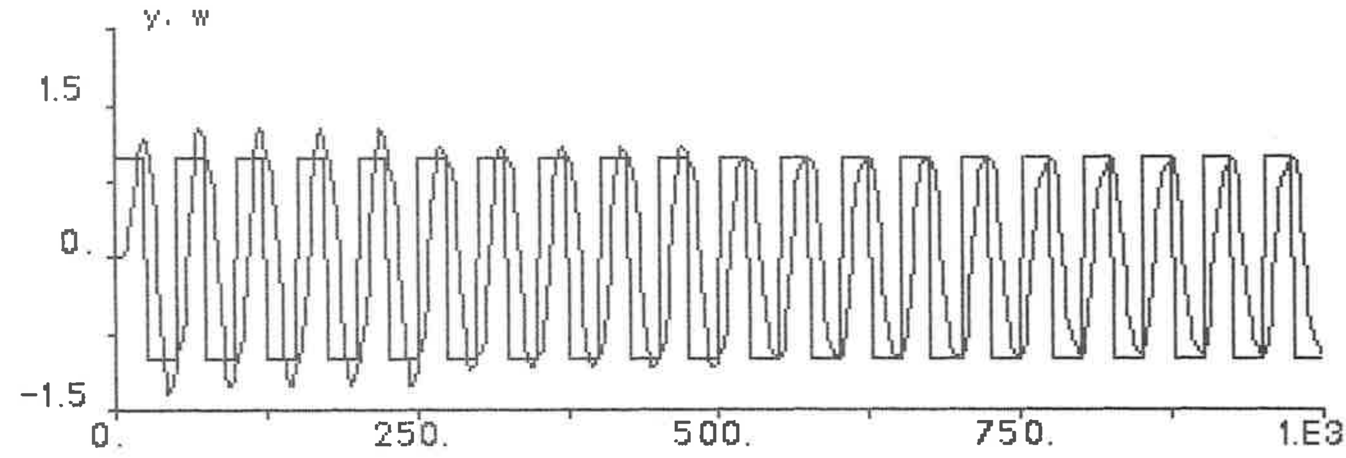
Utsignal och referenssignal då polynomen (4.3.2) har används visas i figur 4.3c. Jämfört med Simulering 1 och Simulering 2 är utsignalens stegsvar sämre och översläng saknas. Jämför figur 4.3c med figurerna 4.1d och 4.2a. Jämfört med ovanstående simulering är utsignalens stegsvar lite bättre och översläng saknas. Jämför figurerna 4.3a och 4.3c.
Styrsignalen till processen då (4.3.2) har används visas i figur 4.3d.

Estimeringen av styrlagskoefficienterna i ovanstående två fall är jämförbar med Simulering 2. Koefficienterna antar snabbt sina teoretiska värden. Redovisas ej här.

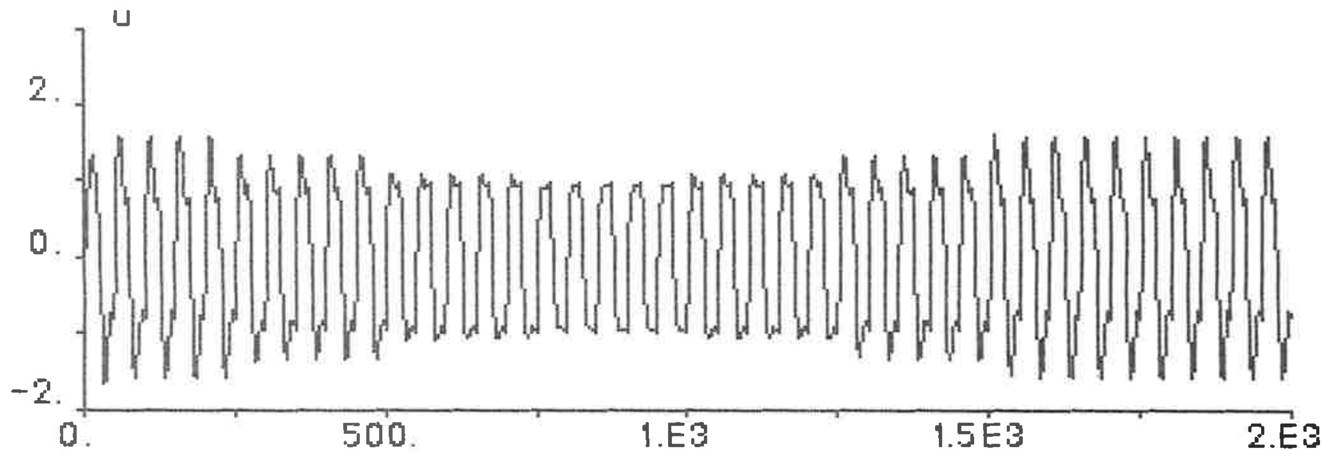
Simuleringar, vilka ej redovisas, har också gjorts med en långsammare referenssignal. Resultatet av dessa är att utsignalens stegsvar blir bättre och att överslängen blir ungefär samma.

Från de simuleringar som gjorts i detta examensarbete går det inte att dra någon slutsats om hur polynomen P, Q och R ska väljas. Det enda som går att säga är att de ska väljas enligt kapitel 3.4 .

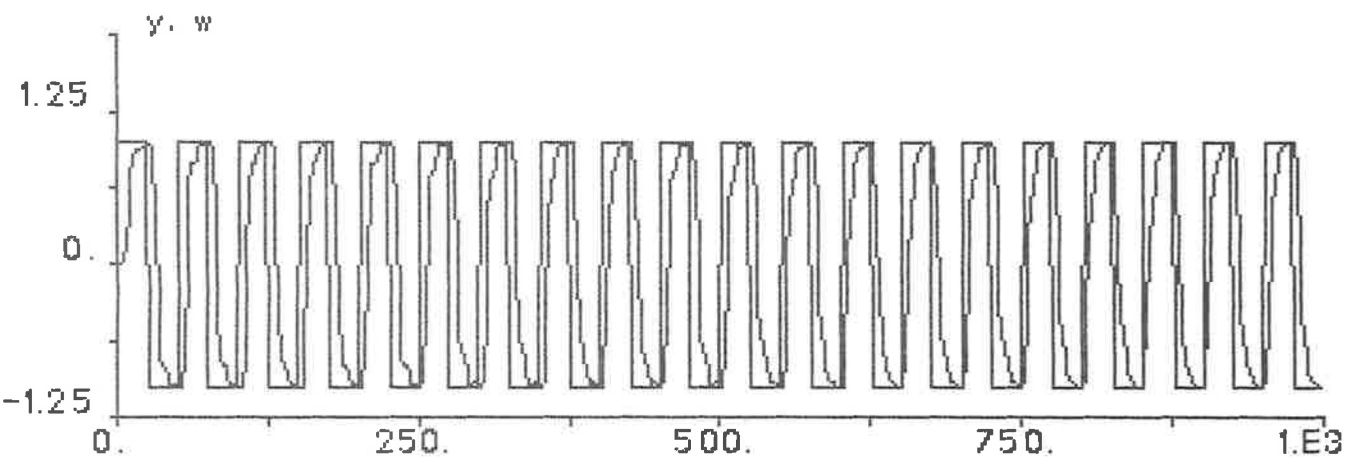
Simulering 3



__Figur 4.3a__ **Förstoring av utsignal och referenssignal, y och w. Diskret process.**

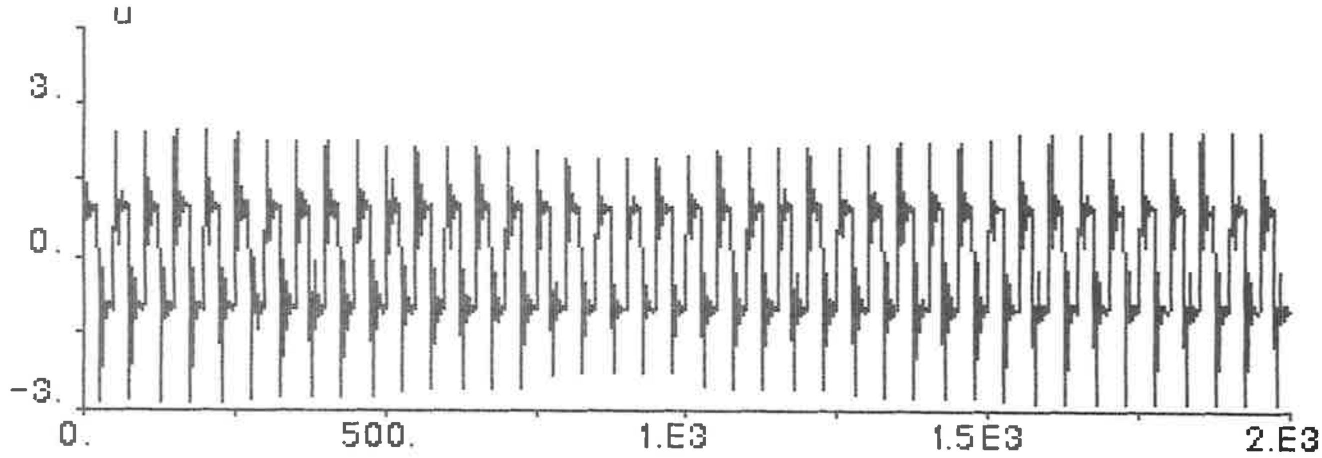


__Figur 4.3b__ **Styrsignal till processen. Diskret process. P, Q och R enligt (4.3.1).**



__Figur 4.3c__ **Förstoring av utsignal och referenssignal, y och w. Diskret process.**

Simulering 3



<u>Figur 4.3d</u> Styrsignal till processen. Diskret process.
P, Q och R enligt (4.3.2).

5. SAMMANFATTNING

Här har visats att den i (Allidina 1982) beskrivna metoden för reglering av system med variabel tidsfördröjning är realiserbar.

Simuleringarna visar att valet av polynomen P, Q och R har stor betydelse för hur väl systemets utsignal följer referenssignalen.

Däremot är estimeringen av styrlagskoefficienterna mindre känslig för valet av polynomen P, Q och R .

Simuleringarna visar också att systemets utsignal följer referenssignalen bättre då denna inte ändras för snabbt.

En jämförelse med den här använda metoden och den i (Palmgren 1982) använda metoden visar att systemets utsignal följer referenssignalen ungefär lika bra i de båda metoderna. Både beträffande stegsvar och översläng. Regulatorparametrarna estimeras däremot betydligt bättre i den här använda metoden. De antar sina teoretiska värden betydligt snabbare.

Svårigheten med den här metoden är hur polynomen P, Q och R ska väljas. Beräkningen av regulatorkoefficienterna är svårare i den av (Palmgren 1982) använda metoden än i den metod som har används här.

De bör observeras att de är olika bandbredder för det slutna systemet här och i (Palmgren 1982). De bör också observeras att här flyttar sig det slutna systemets poler då tidsfördröjningen ändras medan de är fixa i (Palmgren 1982).

Referenser

Allidina, A Y	Optimization and pole-placement for self-tuning control of systems with variable time delay. Control Systems Centre, UMIST, P.O. Box 88, Manchester, M60 1QD
Clarke, D W Gawthrop, P J	Self-tuning control PROC. IEE, Vol. 122, No. 9 SEPTEMBER 1975
Clarke, D W Gawthrop, P J	Self-tuning control PROC. IEE, Vol. 126, No. 6 JUNE 1979
Elmqvist, H	Simnon - an interactive simulation program for nonlinear systems. Report 7502 April 1975 Department of Automatic Control Lund Institute of Technology
Gustavsson, I	User's guide for a program package for simulation of self tuning regulators. LUTFD2/(TFRT-7149)/1-076/(1978)
Palmgren, M	En självinställande PID-regulator för system med variabel tidsfördröjning. LUTFD2/(TFRT-5283)/1-058/(1982)
Aström, K J Wittenmark, B	Computer Control Theory 1982 Department of Automatic Control Lund Institute of Technology

Programlistor

```
MACRO GSYST36                               " Simulation 1

LET IVR.=8                                  "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF SYSTEM2 DELAY2 STUREG CON36

PAR ID:1                                    "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:5
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:0
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.975
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR A1:-1.513723                            "Parameters of SYSTYEM2
,A2:0.582747
,BO[SYSTEM2]:0.0376127
,B1:0.0314123

PAR q0:1                                    "Parameters of SFI2
,p0:1
,r0[SFI2]:2

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 TH8
STORE y[SYSTEM2] u[SYSTEM2] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c1[DELAY2] c2[DELAY2] c3[DELAY2] c4[DELAY2] -add
STORE u[DELAY2] y[DELAY2] -add

ERROR 0.000001
ALGOR RKFIX

"simu 0 2000 1

END
```

Appendix A

```
MACRO GSYST37                                  "Simulation 1

LET IVR.=8                                     "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF TWO DELAY1 STUREG CON37

PAR ID:1                                       "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:5
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:0
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.975
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR q0:1                                       "Parameters of SFI2
,p0:1
,r0[SFI2]:2

PAR b:0.3                                      "Parameters of TWO
,z:0.90

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 TH8
STORE y[TWO] u[TWO] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c0[DELAY1] c1[DELAY1] c2[DELAY1] c3[DELAY1] -add
STORE u[DELAY1] y[DELAY1] -add

ERROR 0.000001
ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

```
MACRO GSYST40                          "Simulation 2

LET IVR.=7                             "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF SYSTEM2 DELAY2 STUREG CON40

PAR ID:1                               "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR A1:-1.513723                       "Parameters of SYSTEM2
,A2:0.582747
,BO[SYSTEM2]:0.0376127
,B1:0.0314123

PAR q0:0                               "Parameters of SFI2
,p0:1
,r0[SFI2]:2

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 h0[CONTR5]
STORE y[SYSTEM2] u[SYSTEM2] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c1[DELAY2] c2[DELAY2] c3[DELAY2] c4[DELAY2] -add
STORE u[DELAY2] y[DELAY2] -add

ERROR 0.000001
ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

Appendix A

```
MACRO GSYST41                          "Simulation 2

LET IVR.=7                             "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF TWO DELAY1 STUREG CON41

PAR ID:1                               "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR q0:0                               "Parameters of SFI2
,p0:1
,r0[SFI2]:2

PAR b:0.3                              "Parameters of TWO
,z:0.90

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 h0[CONTR5]
STORE y[TWO] u[TWO] f1 nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c0[DELAY1] c1[DELAY1] c2[DELAY1] c3[DELAY1] -add
STORE u[DELAY1] y[DELAY1] -add

ERROR 0.000001
ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

```
MACRO GSYST42                                   "Simulation 3

LET IVR.=7                                      "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF SYSTEM2 DELAY2 STUREG CON42

PAR ID:1                                        "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR A1:-1.513723                                "Parameters of SYSTEM2
,A2:0.582747
,B0[SYSTEM2]:0.0376127
,B1:0.0314123

PAR q0:0                                        "Parameters of SFI2
,q1:-1
,p0:1
,p1:-0.80
,r0[SFI2]:0.20

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 h0[CONTR5]
STORE y[SYSTEM2] u[SYSTEM2] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c1[DELAY2] c2[DELAY2] c3[DELAY2] c4[DELAY2] -add
STORE u[DELAY2] y[DELAY2] -add

ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

```
MACRO GSYST43                            "Simulation 3

LET IVR.=7                               "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF TWO DELAY1 STUREG CON43

PAR ID:1                                 "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR q0:0                                 "Parameters of SFI2
,q1:-1
,p0:1
,p1:-0.80
,r0[SFI2]:0.20

PAR b:0.3                                "Parameters of TWO
,z:0.90

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 h0[CONTR5]
STORE y[TWO] u[TWO] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c0[DELAY1] c1[DELAY1] c2[DELAY1] c3[DELAY1] -add
STORE u[DELAY1] y[DELAY1] -add

ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

```
MACRO GSYST44                               "Simulation 3

LET IVR.=7                                  "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF SYSTEM2 DELAY2 STUREG CON44

PAR ID:1                                    "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR A1:-1.513723                            "Parameters of SYSTEM2
,A2:0.582747
,BO[SYSTEM2]:0.0376127
,B1:0.0314123

PAR q0:0                                    "Parameters of SFI2
,q1:-1
,q2[SFI2]:0.6
,p0:1
,p1:-0.80
,rO[SFI2]:0.80

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 hO[CONTR5]
STORE y[SYSTEM2] u[SYSTEM2] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c1[DELAY2] c2[DELAY2] c3[DELAY2] c4[DELAY2] -add
STORE u[DELAY2] y[DELAY2] -add

ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

```
MACRO GSYST45                        "Simulation 3

LET IVR.=7                           "Global variabels
,ISA.=4
,ISB.=20

syst CONTR5 SFI2 REF TWO DELAY1 STUREG CON45

PAR ID:1                             "Parameters of STUREG
,REG:0

PAR N1:0
,N2:4
,N3:2
,N4:1

PAR K1:0
,K2:1
,K3:0
,K4:0

PAR WTI:0.96
,WTM:1
,THO1:0.1
,THO2:1

PAR q0:0                             "Parameters of SFI2
,q1:-1
,q2[SFI2]:0.6
,p0:1
,p1:-0.80
,r0[SFI2]:0.80

PAR b:0.3                            "Parameters of TWO
,z:0.90

STORE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 TH6 TH7 h0[CONTR5]
STORE y[TWO] u[TWO] fi nfi2 y[REF] u[CONTR5] -add
STORE c0[DELAY1] c1[DELAY1] c2[DELAY1] c3[DELAY1] -add
STORE u[DELAY1] y[DELAY1] -add

ALGOR RKFIX

"Simu 0 2000 1

END
```

Appendix A

```
DISCRETE SYSTEM CONTR5
"Compute Hu=-Gy-Ew
"H,G and E estimate polynomials in q*-1
"degH=4
"degG=1
"degE=0

STATE  u1 u2 u3 u4 y1
NEW    nu1 nu2 nu3 nu4 ny1
INPUT  h0 h1 h2 h3 h4 g0 g1 e0 y w
OUTPUT u
TIME   t
TSAMP  ts

k=-(h1*u1+h2*u2+h3*u3+h4*u4+g0*y+g1*y1+e0*w)/h0

u=if abs(k)<x then k else if k>x then x else -x

nu1=u
nu2=u1
nu3=u2
nu4=u3

ny1=y

ts=t+h

h:1

x:1000

END
```

```
DISCRETE SYSTEM DELAY1
" Compute the discrete timevarying timedelay
" Maximum timedelay = 10 , minimum timedelay = 0

STATE  x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10
NEW    nx1 nx2 nx3 nx4 nx5 nx6 nx7 nx8 nx9 nx10
INPUT  c0 c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 c10 u
OUTPUT y
TIME   t
TSAMP  ts

y1=c0*u+c1*x1+c2*x2+c3*x3+c4*x4+c5*x5
y2=c6*x6+c7*x7+c8*x8+c9*x9+c10*x10
y=y1+y2

nx1=u
nx2=x1
nx3=x2
nx4=x3
nx5=x4
nx6=x5
nx7=x6
nx8=x7
nx9=x8
nx10=x9

ts=t+h

h:1

END
```

```
DISCRETE SYSTEM DELAY2
" Compute the discrete timevarying timedelay
" Maximum timedelay = 10 , minimum timedelay = 1

STATE  x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10
NEW    nx1 nx2 nx3 nx4 nx5 nx6 nx7 nx8 nx9 nx10
INPUT  c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 c10 u
OUTPUT y
TIME   t
TSAMP  ts

y1=c1*x1+c2*x2+c3*x3+c4*x4+c5*x5
y2=c6*x6+c7*x7+c8*x8+c9*x9+c10*x10
y=y1+y2

nx1=u
nx2=x1
nx3=x2
nx4=x3
nx5=x4
nx6=x5
nx7=x6
nx8=x7
nx9=x8
nx10=x9

ts=t+h

h:1

END
```

Appendix A

```
DISCRETE SYSTEM SFI2
"Compute fi=Py+Qu-Rw
"P,Q and R known polynomials in q*-1
"degP max 5
"degQ max 7
"degR max 4

STATE  u1 u2 u3 u4 u5 u6 u7 u8 y1 y2 y3 y4 y5 w1 w2 w3 w4 w5 fi2
NEW    nu1 nu2 nu3 nu4 nu5 nu6 nu7 nu8 ny1 ny2 ny3 ny4 ny5
NEW    nw1 nw2 nw3 nw4 nw5 nfi2
INPUT  u y w
OUTPUT fi
TIME   t
TSAMP  ts

q=q0*u1+q1*u2+q2*u3+q3*u4+q4*u5+q5*u6+q6*u7+q7*u8
p=p0*y+p1*y1+p2*y2+p3*y3+p4*y4+p5*y5
r=-r0*w1-r1*w2-r2*w3-r3*w4-r4*w5
fi=q+p+r

nfi2=fi2+fi*fi

nu1=u
nu2=u1
nu3=u2
nu4=u3
nu5=u4
nu6=u5
nu7=u6
nu8=u7

ny1=y
ny2=y1
ny3=y2
ny4=y3
ny5=y4

nw1=w
nw2=w1
nw3=w2
nw4=w3
nw5=w4

ts=t+h

q0:0
q1:0
q2:0
q3:0
q4:0
q5:0
q6:0
q7:0

p0:0
```

Appendix A

```
p1:0
p2:0
p3:0
p4:0
p5:0

r0:0
r1:0
r2:0
r3:0
r4:0

h:1

END
```

```
DISCRETE SYSTEM SYSTEM2
"Compute yA=Bu
"A and B polynomials in q*-1
"degA max 6
"degB max 6

STATE  y1 y2 y3 y4 y5 y6 u1 u2 u3 u4 u5 u6
NEW    ny1 ny2 ny3 ny4 ny5 ny6 nu1 nu2 nu3 nu4 nu5 nu6
INPUT  u
OUTPUT y
TIME   t
TSAMP  ts

a=-a1*y1-a2*y2-a3*y3-a4*y4-a5*y5-a6*y6
b=b0*u+b1*u1+b2*u2+b3*u3+b4*u4+b5*u5+b6*u6
y=a+b

ny1=y
ny2=y1
ny3=y2
ny4=y3
ny5=y4
ny6=y5

nu1=u
nu2=u1
nu3=u2
nu4=u3
nu5=u4
nu6=u5

ts=t+h

a1:0
a2:0
a3:0
a4:0
a5:0
a6:0

b0:0
b1:0
b2:0
b3:0
b4:0
b5:0
b6:0

h:1

END
```

Appendix A

```
CONTINUOUS SYSTEM TWO  "Continuous process

INPUT  u
OUTPUT y
STATE  x1 x2
DER    dx1 dx2

dx1=x2
dx2=b*b*(u-x1)-2*z*b*x2

y=x1

b:0.3
z:0.9

END


DISCRETE SYSTEM REF  "Reference signal

TIME   t
OUTPUT y
TSAMP  ts

y=if mod(t,per)<(0.5*per-eps) then niv1 else niv2

ts=t+h

per:50
niv1:1
niv2:-1
eps:0.000001
h:1

END
```

Appendix A

```
CONNECTING SYSTEM CON36
*Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY2 and SYSTEM2

TIME   t

h0[CONTR5]=TH1[STUREG]
h1[CONTR5]=TH2[STUREG]
h2[CONTR5]=TH3[STUREG]
h3[CONTR5]=TH4[STUREG]
h4[CONTR5]=TH5[STUREG]
g0[CONTR5]=TH6[STUREG]
g1[CONTR5]=TH7[STUREG]
e0[CONTR5]=TH8[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[SYSTEM2]
U4[STUREG]=y[REF]

u[SYSTEM2]=y[DELAY2]
y[CONTR5]=y[SYSTEM2]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY2]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[SYSTEM2]
w[SFI2]=y[REF]

c1[DELAY2]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c2[DELAY2]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c3[DELAY2]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c4[DELAY2]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c5[DELAY2]=0
c6[DELAY2]=0
c7[DELAY2]=0
c8[DELAY2]=0
c9[DELAY2]=0
c10[DELAY2]=0

help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

Appendix A

```
CONNECTING SYSTEM CON37
"Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY1 and TWO

TIME   t

h0[CONTR5]=TH1[STUREG]
h1[CONTR5]=TH2[STUREG]
h2[CONTR5]=TH3[STUREG]
h3[CONTR5]=TH4[STUREG]
h4[CONTR5]=TH5[STUREG]
g0[CONTR5]=TH6[STUREG]
g1[CONTR5]=TH7[STUREG]
e0[CONTR5]=TH8[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[TWO]
U4[STUREG]=y[REF]

u[TWO]=y[DELAY1]
y[CONTR5]=y[TWO]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY1]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[TWO]
w[SFI2]=y[REF]

c0[DELAY1]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c1[DELAY1]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c2[DELAY1]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c3[DELAY1]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c4[DELAY1]=0
c5[DELAY1]=0
c6[DELAY1]=0
c7[DELAY1]=0
c8[DELAY1]=0
c9[DELAY1]=0
c10[DELAY1]=0
help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON40
"Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY2 and SYSTEM2

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[SYSTEM2]
U4[STUREG]=y[REF]

u[SYSTEM2]=y[DELAY2]
y[CONTR5]=y[SYSTEM2]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY2]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[SYSTEM2]
w[SFI2]=y[REF]

c1[DELAY2]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c2[DELAY2]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c3[DELAY2]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c4[DELAY2]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c5[DELAY2]=0
c6[DELAY2]=0
c7[DELAY2]=0
c8[DELAY2]=0
c9[DELAY2]=0
c10[DELAY2]=0

help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON41
"Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY1 and TWO

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[TWO]
U4[STUREG]=y[REF]

u[TWO]=y[DELAY1]
y[CONTR5]=y[TWO]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY1]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[TWO]
w[SFI2]=y[REF]

c0[DELAY1]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c1[DELAY1]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c2[DELAY1]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c3[DELAY1]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c4[DELAY1]=0
c5[DELAY1]=0
c6[DELAY1]=0
c7[DELAY1]=0
c8[DELAY1]=0
c9[DELAY1]=0
c10[DELAY1]=0
help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON42
"Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY2 and SYSTEM2

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[SYSTEM2]
U4[STUREG]=y[REF]

u[SYSTEM2]=y[DELAY2]
y[CONTR5]=y[SYSTEM2]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY2]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[SYSTEM2]
w[SFI2]=y[REF]

c1[DELAY2]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c2[DELAY2]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c3[DELAY2]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c4[DELAY2]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c5[DELAY2]=0
c6[DELAY2]=0
c7[DELAY2]=0
c8[DELAY2]=0
c9[DELAY2]=0
c10[DELAY2]=0

help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON43
"Connect STUREG, CONTR5, SFI2, REF, DELAY1 and TWO

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[TWO]
U4[STUREG]=y[REF]

u[TWO]=y[DELAY1]
y[CONTR5]=y[TWO]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY1]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[TWO]
w[SFI2]=y[REF]

c0[DELAY1]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c1[DELAY1]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c2[DELAY1]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c3[DELAY1]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c4[DELAY1]=0
c5[DELAY1]=0
c6[DELAY1]=0
c7[DELAY1]=0
c8[DELAY1]=0
c9[DELAY1]=0
c10[DELAY1]=0
help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON44
"Connect STUREG,CONTR5,SFI2,REF,DELAY2 and SYSTEM2

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[SYSTEM2]
U4[STUREG]=y[REF]

u[SYSTEM2]=y[DELAY2]
y[CONTR5]=y[SYSTEM2]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY2]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[SYSTEM2]
w[SFI2]=y[REF]

c1[DELAY2]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c2[DELAY2]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c3[DELAY2]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c4[DELAY2]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c5[DELAY2]=0
c6[DELAY2]=0
c7[DELAY2]=0
c8[DELAY2]=0
c9[DELAY2]=0
c10[DELAY2]=0

help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

Appendix A

```
CONNECTING SYSTEM CON45
"Connect STUREG, CONTR5, SFI2, REF, DELAY1 and TWO

TIME   t

h0[CONTR5]=1
h1[CONTR5]=TH1[STUREG]
h2[CONTR5]=TH2[STUREG]
h3[CONTR5]=TH3[STUREG]
h4[CONTR5]=TH4[STUREG]
g0[CONTR5]=TH5[STUREG]
g1[CONTR5]=TH6[STUREG]
e0[CONTR5]=TH7[STUREG]

U1[STUREG]=fi[SFI2]
U2[STUREG]=u[CONTR5]
U3[STUREG]=y[TWO]
U4[STUREG]=y[REF]

u[TWO]=y[DELAY1]
y[CONTR5]=y[TWO]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY1]=u[CONTR5]

u[SFI2]=u[CONTR5]
y[SFI2]=y[TWO]
w[SFI2]=y[REF]

c0[DELAY1]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c1[DELAY1]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c2[DELAY1]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c3[DELAY1]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c4[DELAY1]=0
c5[DELAY1]=0
c6[DELAY1]=0
c7[DELAY1]=0
c8[DELAY1]=0
c9[DELAY1]=0
c10[DELAY1]=0
help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

END
```

```
MACRO GTRUE36                           "Simulation of the output
                                        "from the system when the
                                        "theoritical parameters in
                                        "the control law are used.

syst CONTR5 SYSTEM2 DELAY2 REF TRUE

STORE y[SYSTEM2] y[ref]

PAR per:100

PAR A1:-1.513723                        "Parameters of SYSTEM2
,A2:0.582747
,B0[SYSTEM2]:0.0376127
,B1:0.0314123

PAR a:1                                 "k=4
,b:0
,c:0
,d:0.0376
,e:0.0314
,f:1.5137
,g:-0.5827
,h[TRUE]:-2
SIMU 0 250 0.1/k1

PAR a:1                                 "k=3
,b:0
,c:0.0376
,d:0.0314
,e:0
SIMU 251 500 -cont/k2

PAR a:1                                 "k=2
,b:0.0376
,c:0.0314
,d:0
,e:0
SIMU 501 750 -cont/k3

PAR a:1.0376                            "k=1
,b:0.0314
,c:0
,d:0
,e:0
SIMU 751 1000 -cont/k4

PAR a:1                                 "k=2
,b:0.0376
,c:0.0314
,d:0
,e:0
SIMU 1001 1250 -cont/k5

PAR a:1                                 "k=3
```

```
,b:0
,c:0.0376
,d:0.0314
,e:0
SIMU 1251 1500 -cont/k6

PAR a:1                                  "k=4
,b:0
,c:0
,d:0.0376
,e:0.0314
SIMU 1501 2000 -cont/k7

END



MACRO RITA                               "Draw figures to GTRUE36

SPLIT 2 1

AXES h 0 2000 v -2 2

SHOW y[SYSTEM2]/k1
SHOW y[SYSTEM2]/k2
SHOW y[SYSTEM2]/k3
SHOW y[SYSTEM2]/k4
SHOW y[SYSTEM2]/k5
SHOW y[SYSTEM2]/k6
SHOW y[SYSTEM2]/k7

text' y'

AXES h 0 1000

SHOW y[SYSTEM2] y[REF]/k1
SHOW y[SYSTEM2] y[REF]/k2
SHOW y[SYSTEM2] y[REF]/k3
SHOW y[SYSTEM2] y[REF]/k4

text' y, w'

END
```

```
CONNECTING SYSTEM TRUE
"Connect CONTR5,REF,DELAY2 and SYSTEM2

TIME   t

h0[CONTR5]=a
h1[CONTR5]=b
h2[CONTR5]=c
h3[CONTR5]=d
h4[CONTR5]=e
g0[CONTR5]=f
g1[CONTR5]=g
e0[CONTR5]=h

u[SYSTEM2]=y[DELAY2]
y[CONTR5]=y[SYSTEM2]
w[CONTR5]=y[REF]
u[DELAY2]=u[CONTR5]

c1[DELAY2]=if (t<t1 and t>t2) then 1 else 0
c2[DELAY2]=if (t<t3 and t>t4) then 1 else help1
c3[DELAY2]=if (t<t7 and t>t8) then 1 else help2
c4[DELAY2]=if t<t11 then 1 else if t>t12 then 1 else 0
c5[DELAY2]=0
c6[DELAY2]=0
c7[DELAY2]=0
c8[DELAY2]=0
c9[DELAY2]=0
c10[DELAY2]=0

help1=if (t<t5 and t>t6) then 1 else 0
help2=if (t<t9 and t>t10) then 1 else 0
t1:1000
t2:749
t3:750
t4:499
t5:1250
t6:999
t7:500
t8:249
t9:1500
t10:1249
t11:250
t12:1499

a:0
b:0
c:0
d:0
e:0
f:0
g:0
h:0

END
```

Beräkning av poler och nollställen

Detta exempel avser att visa hur polerna och nollställena för det slutna systemet ändras då systemets totala tidsfördröjning k varierar i steg ,från 4 till 1. Ekvation (3.3.3) ger det slutna systemets poler och nollställen.

Inför:

$$A_m = AQ + q^{-(k-1)} BP$$

$$B_m = q^{-k} BR$$

Polynom:

$$P = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2}$$

$$Q = 1 + q_1 q^{-1} + q_2 q^{-2}$$

$$R = r_0$$

$$A = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}$$

$$B = b_0 + b_1 q^{-1}$$

Då blir

$$A_m = \left(1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \right) \left(1 + q_1 q^{-1} + q_2 q^{-2} \right) +$$

$$+ q^{-(k-1)} \left(b_0 + b_1 q^{-1} \right) \left(1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} \right)$$

$$B_m = q^{-k} \left(b_0 + b_1 q^{-1} \right) r_0$$

eller utvecklat

$$A_m = 1 + \left(a_1 + q_1 \right) q^{-1} + \left(a_2 + a_1 q_1 + q_2 \right) q^{-2} +$$

$$+ \left(a_1 q_2 + a_2 q_1 \right) q^{-3} + a_2 q_2 q^{-4} +$$

$$+ q^{-(k-1)} \left(b_0 + \left(b_0 p_1 + b_1 \right) q^{-1} + \right.$$

$$+ \left[b_0 p_2 + b_1 p_1 \right] q^{-2} + b_1 p_2 q^{-3} \Big]$$

$$B_m = \left[b_0 q^{-k} + b_1 q^{-(k+1)} \right] r_0$$

a_1, a_2, b_0 och b_1 enligt sidan 12

$p_1 = -0.8$

$p_2 = 0$

$q_1 = -1$

$q_2 = 0.6$

$r_0 = 0.8$ (ger statiska förstärkningen ett)

Med ovanstående koefficienter erhålls följande poler och nollställen:

	poler	nollställen
k=4	0.61±0.53i	-0.85
	0.75	
	0.44	
	0.12	
k=3	0.58±0.61i	-0.85
	0.73	
	0.63	
k=2	0.53±0.64i	0, -0.85
	0.71±0.05i	
k=1	0.49±0.63i	0, 0, -0.85
	0.72±0.07i	