

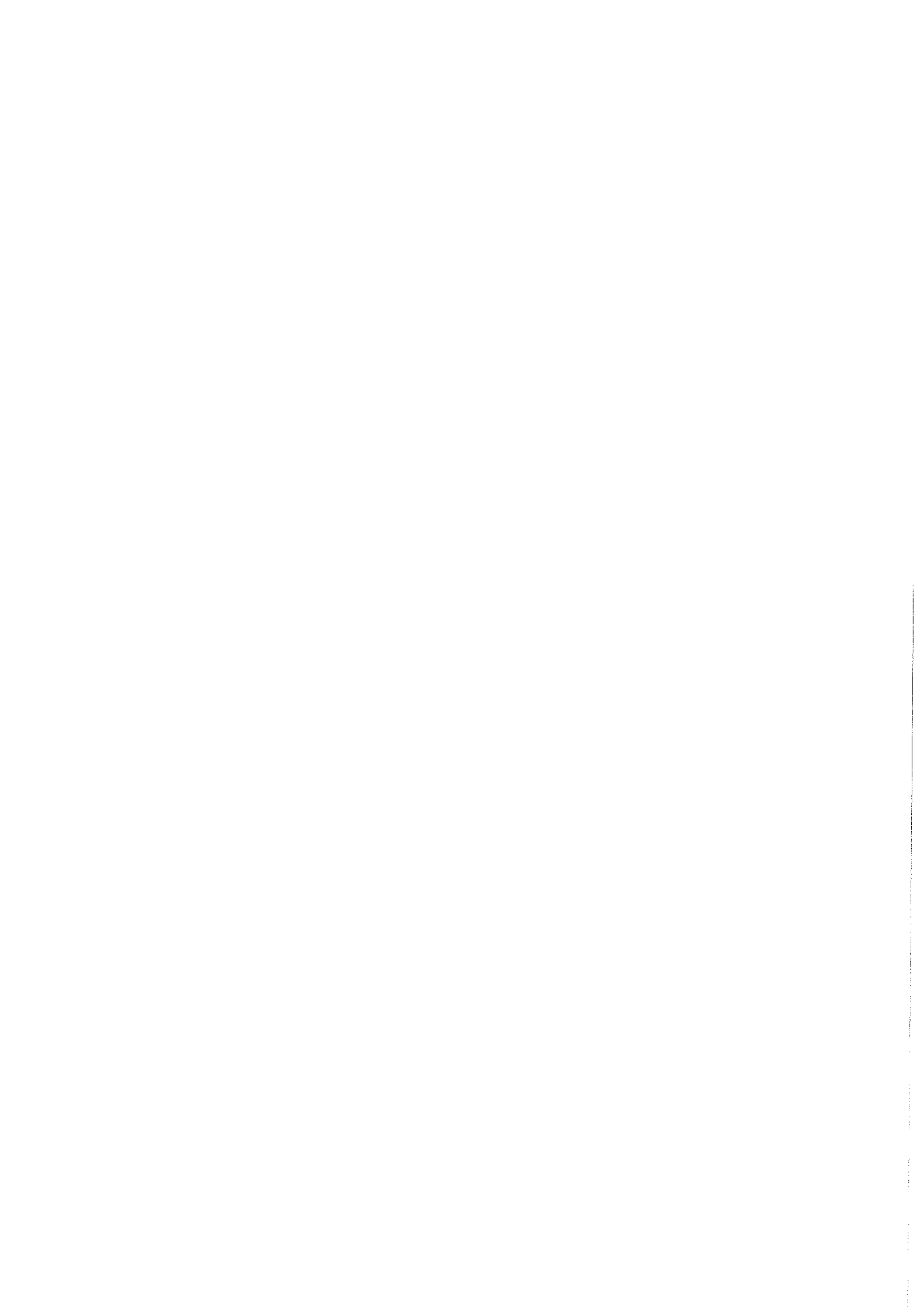
ISSN 0280-5316  
ISRN LUTFD2/TFRT-5487--SE

# Reglering och automatisk regulatorinställning för osymmetriska processer

Anna Tengvall

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
November 1993

<b>Department of Automatic Control</b> <b>Lund Institute of Technology</b> P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> MASTER THESIS	
		<i>Date of issue</i> November 1993	
		<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5487--SE	
<i>Author(s)</i> Anna Tengvall		<i>Supervisor</i> Tore Hägglund	
		<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Reglering och automatisk regulatorinställning för osymmetriska processer (Control and automatic tuning for unsymmetrical processes)			
<i>Abstract</i> <p>The work presented in this thesis treats the development of a new control strategy in order to control unsymmetrical processes, such as heating control of an oven. The control strategy is based on gain scheduling. The gain scheduling is partly controlled by an indication function, which is often unknown. Therefore, two methods to estimate this function are described. A new method of autotuning is also treated. This method is developed out of experiments on relay feedback.</p> <p>The two parts of this work, the control strategy and the autotuning, can be used together. If they are, one has a self-tuning controller for unsymmetrical processes, which was the purpose of this work.</p>			
<i>Key words</i> Adaptive control. Autotuning. Gainscheduling. Unsymmetrical process. Relay feedback.			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i> 0280-5316			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 34	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			



## Innehåll

<b>1. Inledning</b> . . . . .	<b>3</b>
Bakgrund . . . . .	3
Rapportens uppläggning . . . . .	3
<b>2. Modellbeskrivning</b> . . . . .	<b>3</b>
Uppbyggnad av den osymmetriska processen . . . . .	3
<b>3. Reglerstrategi</b> . . . . .	<b>5</b>
Reglering med en uppsättning regulatorparametrar . . . . .	5
Parameterstyrning . . . . .	7
<b>4. Rekonstruktion av indikeringsfunktionen</b> . . . . .	<b>11</b>
Kalmanfiltrering . . . . .	11
Enkel skattning av indikeringsfunktionen . . . . .	13
<b>5. Automatinställning av regulatorparametrarna</b> . . . . .	<b>15</b>
Relämetoden och beskrivande funktion . . . . .	15
Modifierad relämetod . . . . .	17
<b>6. Analys</b> . . . . .	<b>20</b>
Processer med varierande osymmetri . . . . .	20
Högre ordningens processer . . . . .	21
Sammanfattning . . . . .	22
<b>7. Sammanfattning</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>8. Referenser</b> . . . . .	<b>24</b>
<b>A. Programlistning</b> . . . . .	<b>25</b>
Parameterstyrningen . . . . .	25
Modifierade relämetoden . . . . .	29



# 1. Inledning

## Bakgrund

Relämetoden är en effektiv metod för att automatiskt ställa in PID-regulatorer. Tyvärr fungerar metoden inte så bra då processen är osymmetrisk. En osymmetrisk process är olinjär i den meningen att processens arbetsområde kan delas in i två delar, där var del har sin dynamik. Ett exempel på en osymmetrisk process, som också används i denna rapport, är temperaturregleringen av en ugn. En ugn uppvärms ju snabbare än den nerkylls. En annan vanlig tillämpning är klimatreglering av lokaler.

En reglermetod av osymmetriska processer är den s.k. split range metoden. Denna metod går ut på att olika styrdon används beroende på vilket värde styrsignalen har. I det fallet är det relativt lätt att kompensera för osymmetri, t.ex. genom att förstärka den ena av de två regulatorutgångarna. Dessutom fungerar relämetoden i detta fall. Split range reglering behandlas inte vidare i detta examensarbete, utan här behandlas det fall då enbart ett styrdon används för regleringen.

Avsikten med detta examensarbete är dels att bestämma en bra reglerstrategi för osymmetriska processer, dels att modifiera nuvarande relämetod, så att inställningen fungerar bra för osymmetriska processer.

## Rapportens uppläggning

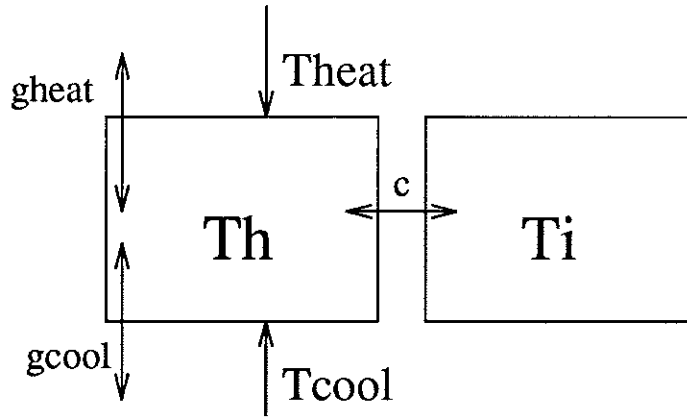
I denna rapport studeras en modell av en typiskt osymmetrisk process. Denna processmodell finns beskriven i kapitel 2. Reglerstrategi för modellen tas fram i kapitel 3. Kapitel 4 behandlar rekonstruktion av tillstånd. Vissa tillstånd kan kanske inte mätas, eller är så brusiga, att en rekonstruktion är att föredra. I kapitel 5 redogörs för själva automatinställningen. Teorin för relämetoden och beskrivande funktion går igenom och varför denna teori ej är tillämpningsbar på osymmetriska processer förklaras. I detta avsnitt läggs också teorierna om den modifierade relämetoden fram. Analysen av den modifierade relämetoden visas i kapitel 6. Där analyseras robustheten, d.v.s. vad som inträffar om den verkliga processen avviker från modellen, som ligger till grund för den modifierade relämetoden. En sammanfattning ges i kapitel 7. Kapitel 8 innehåller en referenslista. Sist i rapporten finns ett appendix, som visar utskrifter av några aktuella Simnonprogram.

# 2. Modellbeskrivning

Många processer är osymmetriska. Temperaturreglering av en ugn är en typisk sådan process. Man kan tänka sig en uppdelning av den osymmetriska processen i två linjära delprocesser, en för upphettning och en för kylning. Vilken delprocess som är aktuell i en viss tidpunkt karakteriseras av en s.k. indikeringsfunktion.

## Uppbyggnad av den osymmetriska processen

Här följer en kort beskrivning av processmodellen. En mycket schematisk bild av processen visas i figur 1. God reglering av temperaturen inne i ugnen,  $T_i$ , är vad vi vill uppnå. En värmeslinga uppettar höljet till temperaturen  $T_h$ . Höljet värmer i sin tur själva ugnsutrymmet. Ugnen förlorar dock värme till omgivningen. Detta motsvarar kylningen av vårt system. Upphettningen går



Figur 1. Schematisk bild av processmodellen.

snabbare än avkyllningen, d.v.s. processen är osymmetrisk. Vi förutsätter att ugnen antingen värms eller kyls, alltså att vi har en insignal till processen. Processens tillståndsbeskrivning bestäms med hjälp av energibalans.

Upphettnig:

$$\begin{aligned} T_h' &= g_{heat}(T_{heat} - T_h) + c(T_i - T_h) \\ T_i' &= c(T_h - T_i) \end{aligned}$$

Kylning:

$$\begin{aligned} T_h' &= g_{cool}(T_{cool} - T_h) + c(T_i - T_h) \\ T_i' &= c(T_h - T_i) \end{aligned}$$

Här är  $g_{heat}$  överföringskoefficienten för upphettning,  $g_{cool}$  överföringskoefficienten för kylning och  $c$  överföringskoefficienten mellan höljet och ugnsutrymme. Som utsignal väljs temperaturen i ugnsutrymme, d.v.s.  $T_i$ . Matrisrepresentationen för processen blir således:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \begin{bmatrix} -(g+c) & c \\ c & -c \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} g \\ 0 \end{bmatrix} u \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} \end{aligned}$$

där  $g = g_{heat}$  då upphettning är fallet,  $g = g_{cool}$  då kylning är fallet och där  $\mathbf{x} = [T_h \ T_i]^T$ . Modellens parametervärden är valda till:

$$c = 1.0$$

$$g_{cool} = 0.1$$

$$g_{heat} = 1.0$$

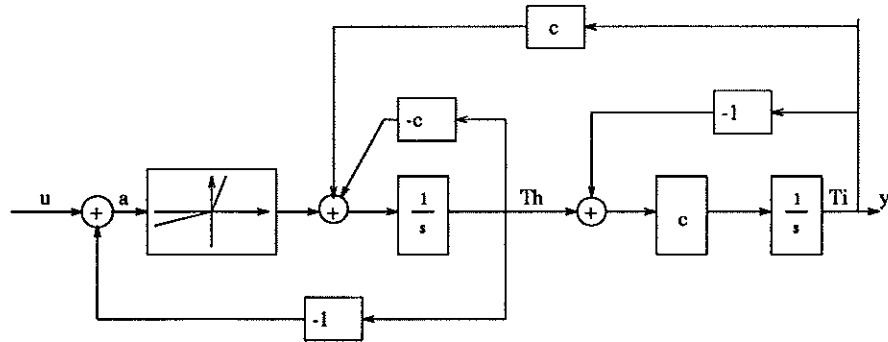
Efter införande av matriserna A, B och C kan uttrycket skrivas om till:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

Genom att Laplacetransformera tillståndsbeskrivningarna kan processens överföringsfunktion beräknas.

$$sT_h = g(U - T_h) + c(T_i - T_h)$$



Figur 2. Processens blockstruktur.

$$sT_i = c(T_h - T_i)$$

$$Y = T_i$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{gc}{s^2 + (2c + g)s + gc}$$

Processens överföringsfunktion kan även åskådliggöras grafiskt. Blockschemat för ugnen visas i figur 2. I detta blockschema framgår klart hur indikeringsfunktionen  $a$  är definierad.

$$a = u - T_h$$

Indikeringsfunktionen skall ses som en parameter som talar om när processmodellen byter dynamik. När  $a$  är positiv är upphettingsdynamiken aktuell, medan ett negativt  $a$  innebär att ugnens dynamik är av kylningskaraktär.

Processmodellen för ugnen, som nu är beskriven, innehåller grova approximationer. Exempelvis så är temperaturen i höljet inte densamma i hela höljet. Men det viktigaste med modellen är att den är osymmetrisk, d.v.s. att den är uppbyggd av två var för sig linjära delprocesser. I figur 3 visas processmodellens stegsvar. Observera att upphettningen går betydligt snabbare än nerkyllningen.

### 3. Reglerstrategi

Hur man bör reglera en osymmetrisk process är ett av problemen som skall lösas. Vilken reglerstrategi skall man använda sig av? I följande två avsnitt skall detta problem behandlas. Först PI-regleras processen med endast en uppsättning regulatorparametrar. Därefter införs två uppsättningar parametrar, d.v.s. regleringen skall förbättras genom parameterstyrning.

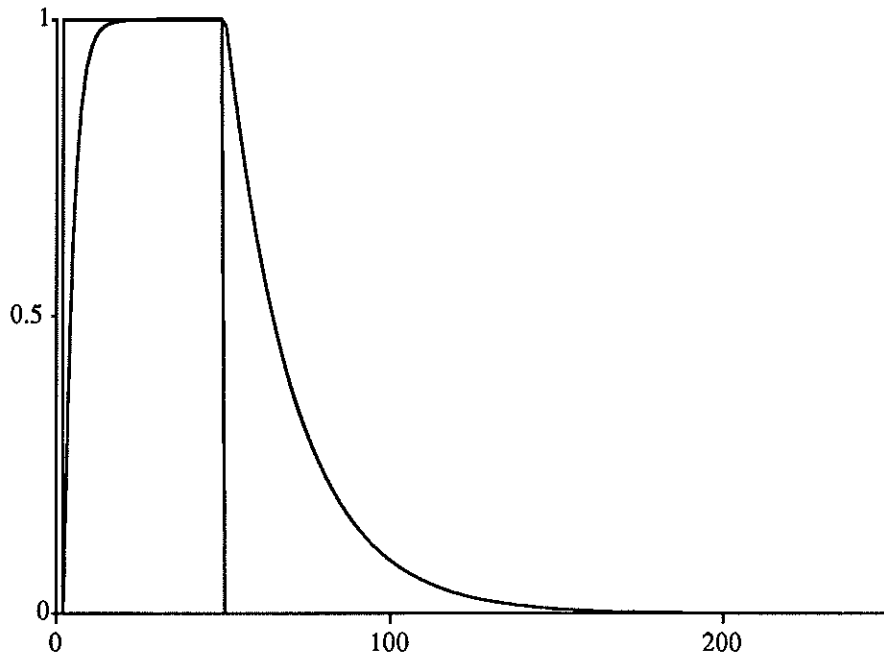
#### Reglering med en uppsättning regulatorparametrar

I figurerna 4 och 5 visas PI-reglering, med parametrar optimerade för kylningsdynamiken, av processen med enbart kyldynamik och av processen med enbart upphettingsdynamik. I figurerna 6 och 7 visas PI-reglering, med parametrar optimerade för upphettingsdynamiken, av samma processer som i figur 4 och 5. Polplaceringen är utförd enligt dominerande polplacering [1]. Regulatorparametrarna optimerade för kyldynamiken respektive upphettingsdynamiken är:

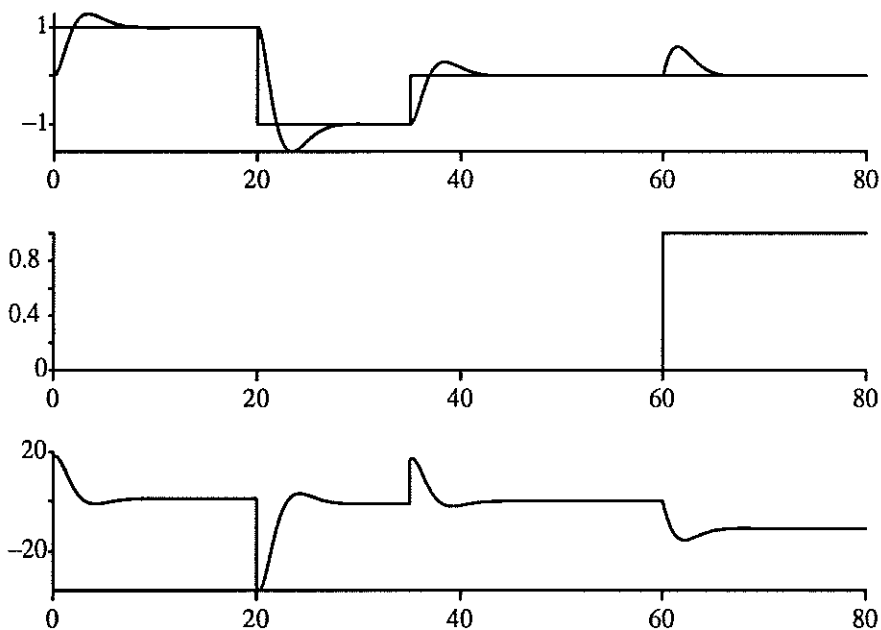
$$K_{cool} = 17.7$$

$$T_{i,cool} = 2.84$$





Figur 3. Stegsvaret från processmodellen.

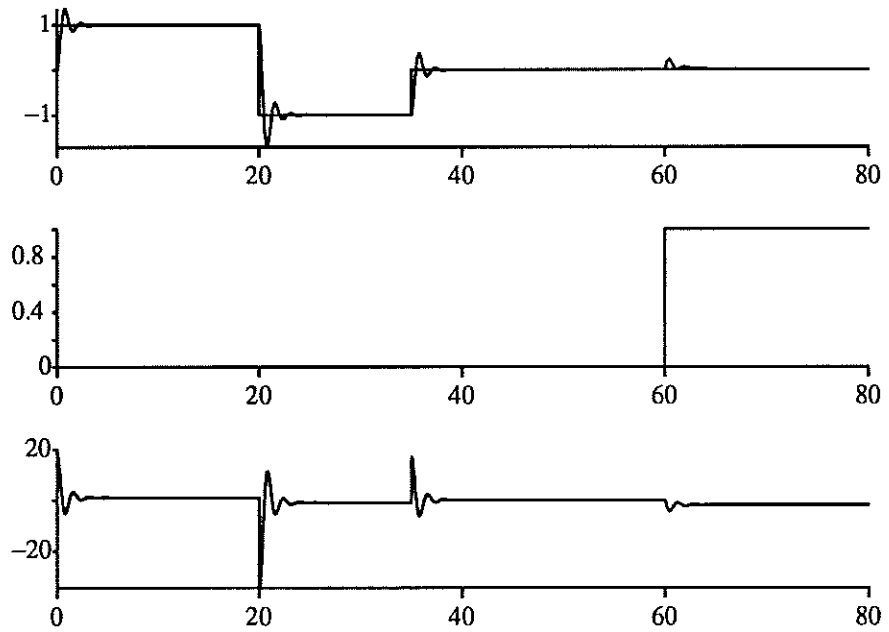


Figur 4. Reglering av en process med enbart kyldynamiken med parametrar optimerade för kylning. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$ , i mitten  $u$  och nederst  $u$ .

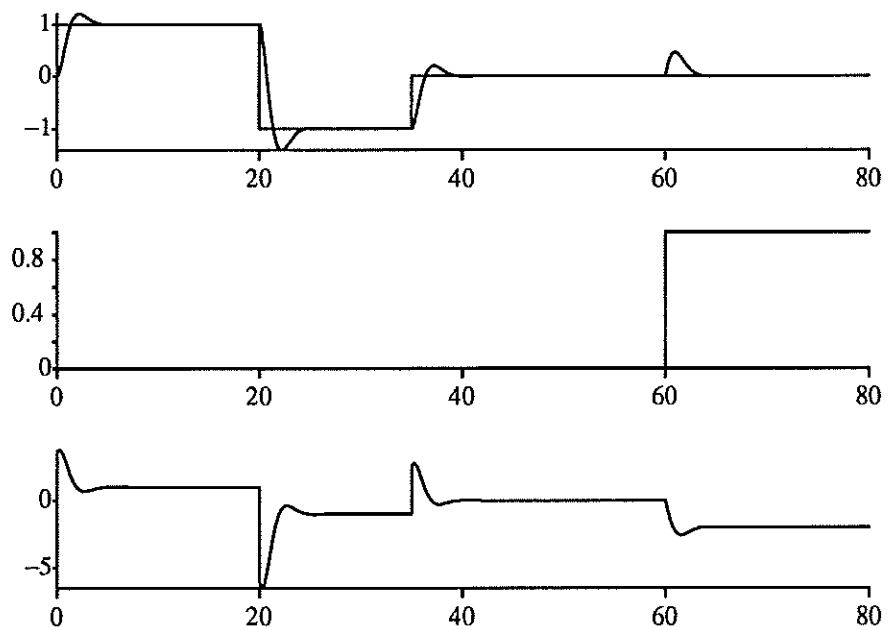
$$K_{heat} = 3.46$$

$$T_{iheat} = 1.40$$

PI-regulatorn med dessa parametrar har egenskapen att den minimerar integralen av reglerfelet vid laststörningar, samtidigt som den ger en Nyquistkurva som undviker en cirkel med centrum i  $-1$  och radien  $\frac{1}{1.4}$ . Efter en studie av plottarna inser man att för att åstadkomma en jämn reglerkvalitet behöver man ha två uppsättningar regulatorparametrar, en uppsättning då upphettningdynamiken är aktuell och en annan uppsättning då kyldynamiken är den



Figur 5. Reglering av en process med enbart upphettningdynamiken med parametrar optimerade för kylning. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$ , i mitten  $l$  och nederst  $u$ .

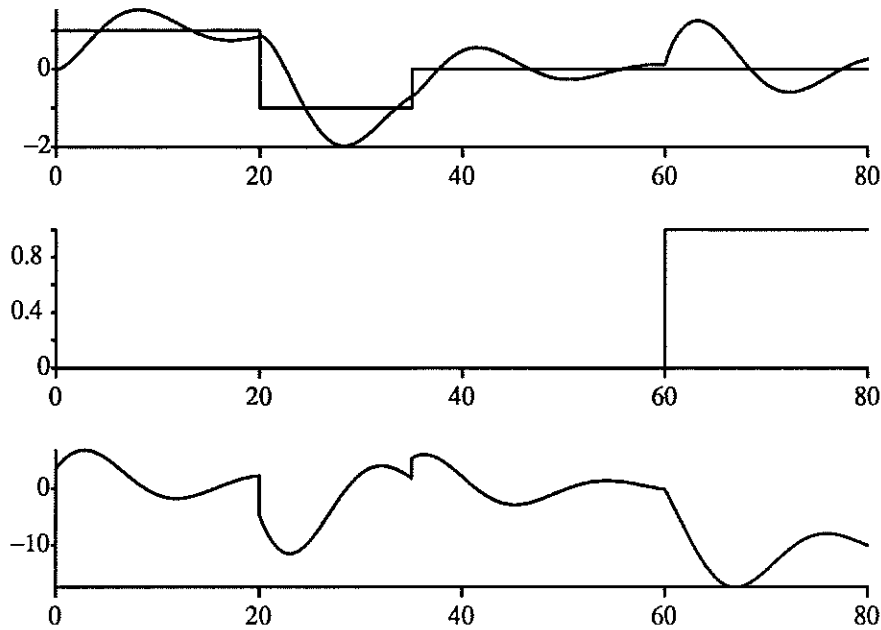


Figur 6. Reglering av en process med enbart upphettningdynamik med parametrar optimerade för upphettning. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$ , i mitten  $l$  och nederst  $u$ .

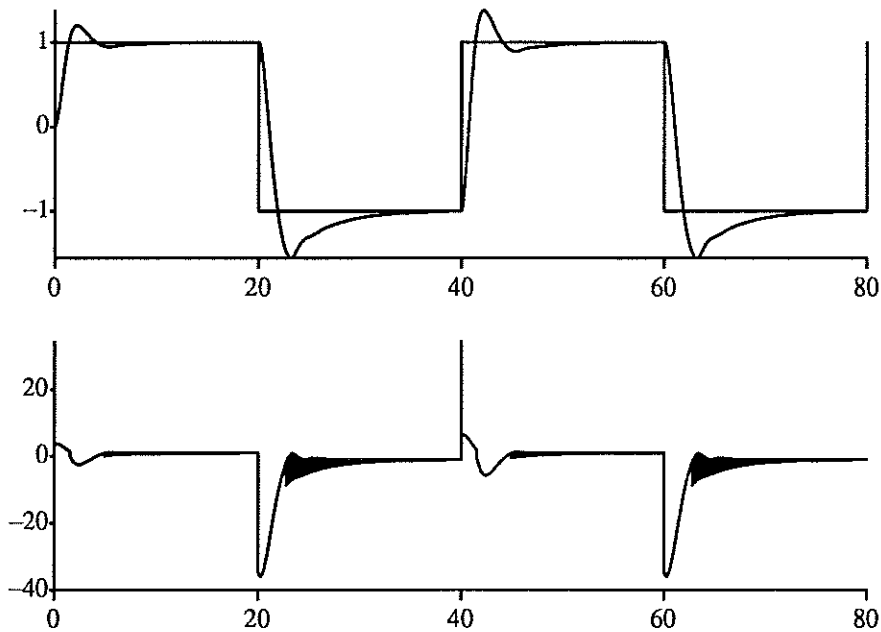
dynamik som gäller.

### Parameterstyrning

Parameterstyrning innebär att man byter regulatorparametrar när vissa bestämda villkor är uppfyllda. I detta fall är önskan, att skifta parametrarna i stort sett då processdynamiken skiftas, vilket bestäms av indikeringsfunktionen. Definitionen av indikeringsfunktionen visas i kapitel 2. I figur 8 visas

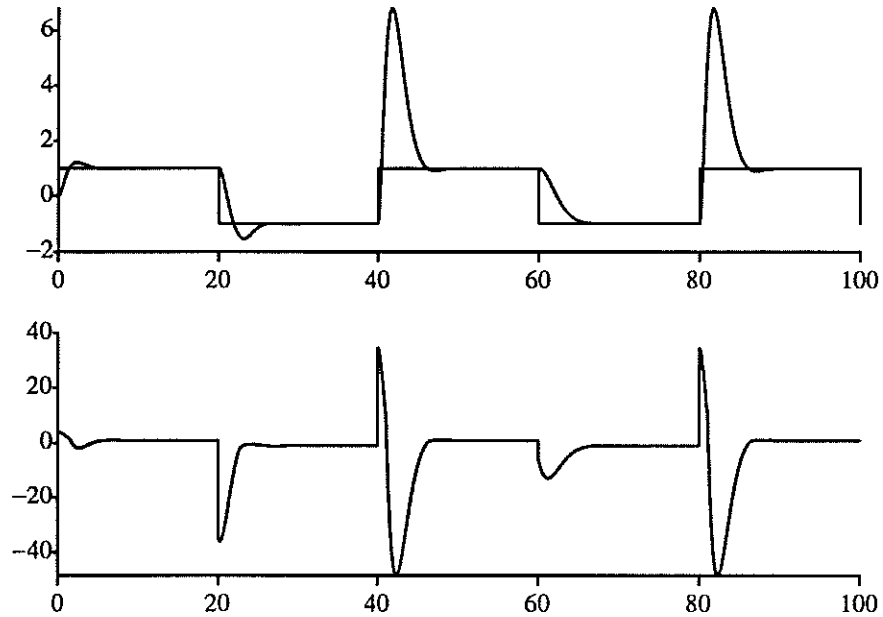


Figur 7. Reglering av en process med enbart kyldynamiken med parametrar optimerade för upphettning. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$ , i mitten  $u$  och nederst  $y$ .



Figur 8. Parameterstyrning utan stötfri övergång. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$  och nederst visas  $u$ .

regleringen som erhålls med parameterstyrning. Tyvärr blir styrsignalen oerhört ryckig när skifte mellan kylparametrarna och upphettningparametrarna äger rum, beroende på att övergången mellan parametrarna inte är stötfri. Lösningen till detta problem är att försöka åstadkomma en stötfri övergång, vilket realiserar sig med att byta ut den konventionella PID-regulatorn mot en inkrementell PID-regulator. En inkrementell PID-regulator skiljer sig från den konventionella PID-regulatorn på så sätt att förändringarna i P-, I- och D-delen räknas ut och sen adderas dessa och förändringen av styrsignalen erhålls. Styrningen sker med den gamla styrsignalen adderad med förändringen av styr-



Figur 9. Reglering med en inkrementell regulator. Överst visas  $y_{ref}$  och  $y$  och  $u$  visas nederst.

signalen. Precis som för den konventionella PID-regulatorn så kan begränsning av styrsignalen också beaktas. Algoritmen för den diskreta inkrementella PID-regulatorn är följande:

$$\Delta P = K(by_{ref} - y - by_{refold} + y_{old})$$

$$\Delta I = \frac{Kh}{T_i}(y_{ref} - y)$$

$$\Delta D = -\frac{KT_d}{h}(y - 2y_{old} + y_{oldold})$$

$$\Delta u = \Delta P + \Delta I + \Delta D$$

$$v = u_{old} + \Delta u$$

$$u = \text{if } (v < u_{min}) \text{ then } u_{min} \text{ else if } (v > u_{max}) \text{ then } u_{max} \text{ else } v$$

Se referens [2]. Här står  $h$  för sampelperioden,  $b$  avgör hur stor del av referenssignalen  $y_{ref}$  som skall tas med i P-delen,  $y$  är systemets utsignal och  $u$  dess styrsignal.  $K$ ,  $T_i$  och  $T_d$  är PID-regulatorns parametrar. Efter införande av den inkrementella PI-regulatorn åstadkommer man regleringen enligt figur 9. Styrsignalen ser mycket bättre ut efter införandet av den inkrementella regulatorn. Ringningarna har upphört. Tyvärr har ett annat problem uppstått, som inte fanns tidigare. Utsignalen gör väldigt stora överslängar när parametrarna byts från kylparametrar till upphettningssparametrar, d.v.s. när referenssignalen stiger. Detta fenomen uppkommer eftersom kylparametrarna bibehålls under den första samplingen efter referensvärdesändringen.

Hittills har indikeringsfunktionen använts för att indikera vilken processdynamik som är aktuell, men också för att ensam avgöra när parameterbyte skall ske. Det sistnämnda är emellertid inte riktigt bra. Ett problem har redan diskuterats, översläng beroende på att fel parametrar används under en samplingsperiod. Komplexiteten av parameterbytet måste utökas, d.v.s. fler faktorer än indikeringsfunktionen måste vara med och bestämma när parameterbyte lämpligen skall ske.

Ytterligare två faktorer implementerades. Den ena har till uppgift att

känna av referenssignalens och utsignalens värde och avgöra om parameterskifte är önskvärt. Det är nämligen inte säkert att bara för att referensvärdet gör ett steg uppåt så skall upphettningsparametrarna väljas. Det beror ju också på utsignalens aktuella värde. Den andra faktorn skall göra beslutet om parameterbyte mer okänsligt för brus, en slags hysteres. Antag att indikeringsfunktionen ligger och växlar snabbt omkring beslutströskeln. Detta skulle innebära att parameteruppsättningarna växlas ideligen, vilket inte är önskvärt. Reglerstrategin kan i princip förklaras med följande algoritm:

```

hystest=if  $a < -\mu$  or ( $par = par_{cool}$  and  $a < \mu$ ) then 1 else -1
skifttest=if  $y'_{ref} < 0$  and  $y > y_{ref}$  then 1
           else if  $y'_{ref} > 0$  and  $y < y_{ref}$  then -1
           else 0
sluttest=if skifttest = 1 or (skifttest = 0 and hystest = 1) then 1
           else if skifttest = -1 or (skifttest = 0 and hystest = -1) then -1
           else 0
par=if sluttest = 1 then  $par_{cool}$ 
      else if sluttest = -1 then  $par_{heat}$ 
      else  $par_{old}$ 

```

Här står  $\mu$  för hysteresgränsen och  $par$  för regulatorparametrarna. I figur 10 visas ett simuleringsresultat av den framtagna reglerstrategin. Resultatet av referensvärdesändringar har plottats liksom inverkan av en laststörning. Laststörningen kommer in i tillståndsbeskrivningen på följande sätt:

$$T_i' = c(T_h - T_i) + cl$$

Exempel på laststörning kan vara att ett kallt föremål läggs in i ugnen. Förutom laststörningen så har ett mätbrus hela tiden legat på och stört. Mätbruset är ett normalfördelat brus. Simuleringen med den framtagna reglerstrategin verkar falla väl ut. Man kan nu konstatera att om tillståndet  $T_h$ , höljets temperatur, kan mätas så är reglerproblemet löst, förutsatt att processen är känd. Men tänk om höljets temperatur inte går att mäta, då är ju också indikeringsfunktionen  $a = u - T_h$  okänd, vilket resulterar i att man inte kan bestämma när parametrarna skall skiftas. Detta leder oss in på nästa avsnitt, rekonstruktion.

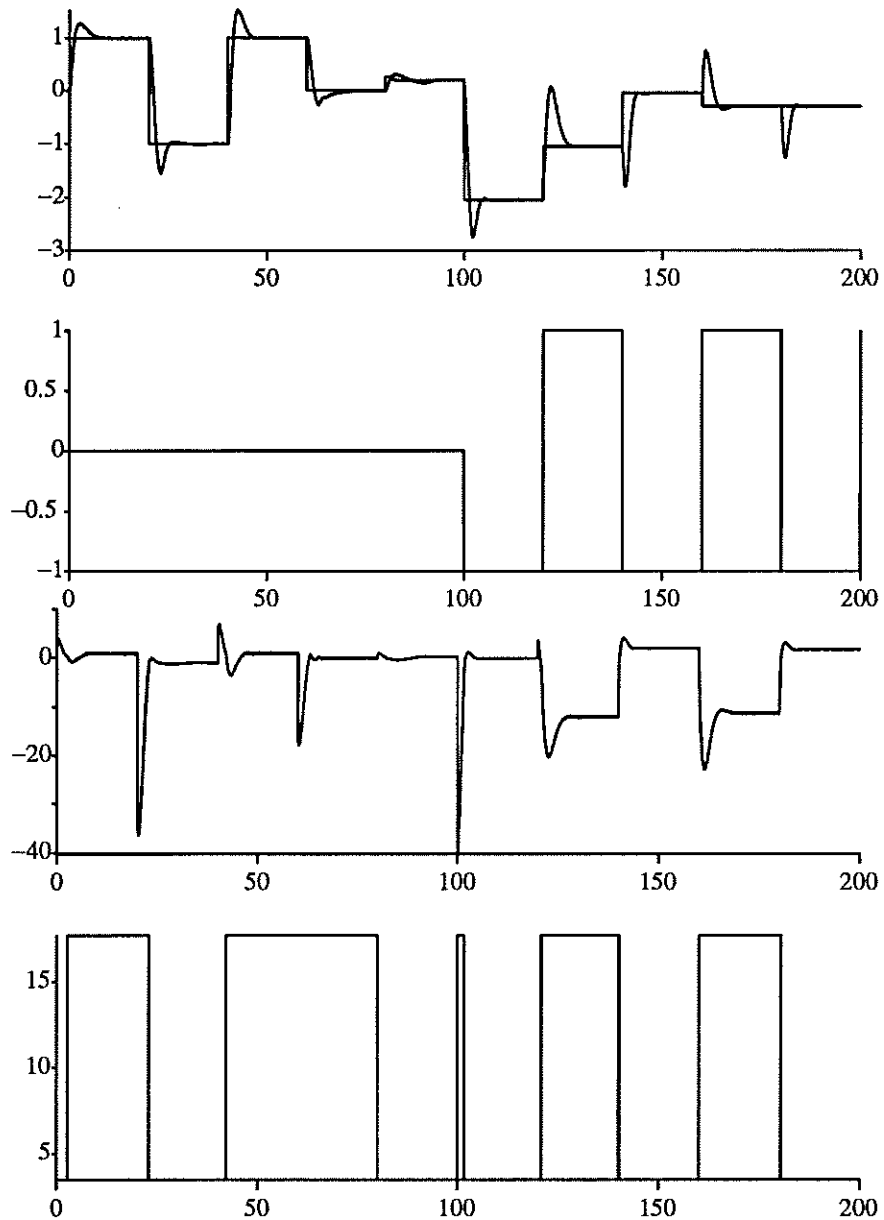
## 4. Rekonstruktion av indikeringsfunktionen

I de fall då tillståndet  $T_h$ , höljets temperatur, inte kan mätas direkt krävs att indikeringsfunktionen skattas i stället. Om processen är känd blir det en rätt så enkel lösning. Man kan exempelvis skatta tillstånden med hjälp av ett Kalmanfilter och den skattade indikeringsfunktionen fås som  $\hat{a} = u - \hat{T}_h$ . Är däremot processen helt okänd krävs lite mer tankearbete för att ta reda på en skattning av indikeringsfunktionen.

### Kalmanfiltrering

Innan man kopplar in observeraren skall man kontrollera att systemet är observerbart, d.v.s. att observerbarhetsmatrisen  $W_o$  är av full rang. Observerbarhetsmatrisen ges av:

$$W_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}$$



Figur 10. Uppifrån visas  $y$  och  $y_{ref}$ ,  $u$  och nederst visas när parameterväxling sker.

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ c & -c \end{bmatrix}$$

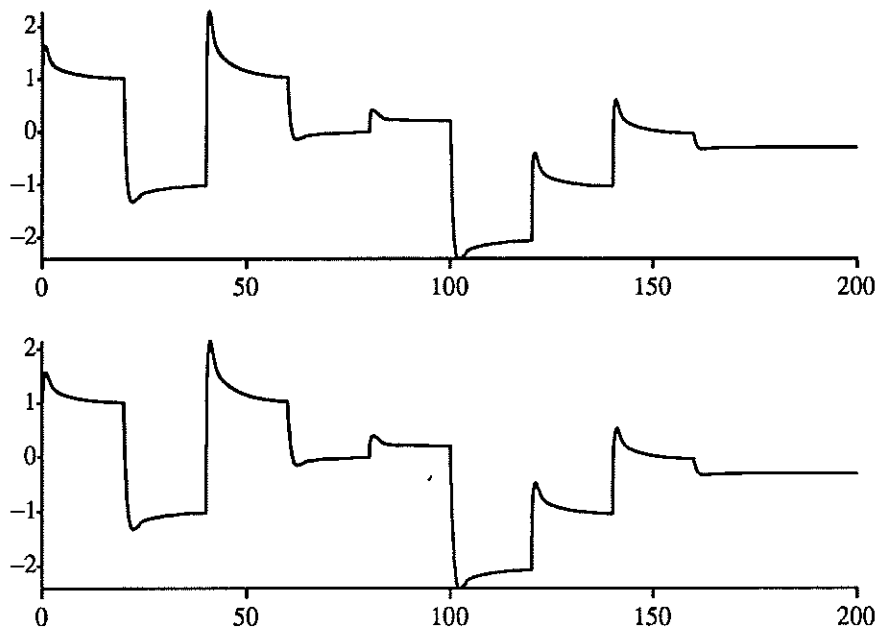
och har uppenbarligen full rang. Kalmanfiltret kan nu bestämmas.

$$\hat{x}' = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x})$$

$$\hat{y} = C\hat{x}$$

Vad man vill uppnå är att rekonstruktionsfelet avtar tillräckligt snabbt, d.v.s. att polerna till  $A - KC$  hamnar tillräckligt långt från origo. Polernas lägen bestäms genom att välja  $K$ -vektor. Rekonstruktionsfelet är:

$$\begin{aligned} \tilde{x}' &= x' - \hat{x}' \\ &= (A - KC)x - (A - KC)\hat{x} \\ &= (A - KC)\tilde{x} \end{aligned}$$



Figur 11. Den verkliga temperaturen och den rekonstruerade temperaturen under ideala förhållanden.

och K-vektorn är:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

Skattarens poler ges av:

$$\det(sI - A + KC) = 0$$

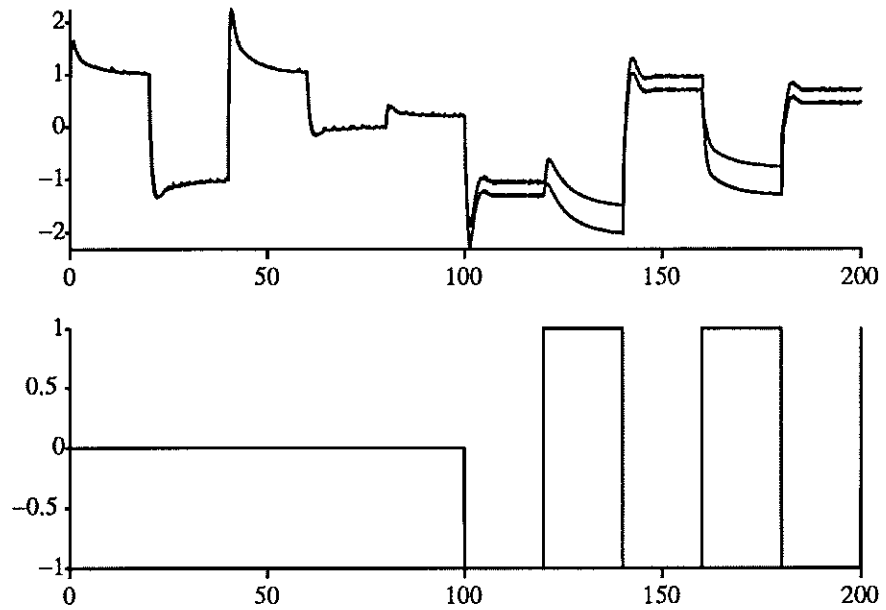
$$s^2 + s(2c + g + k_2) + k_1c + gc + k_2(g + c) = 0$$

Erfarenhet visar att rekonstruktionsfiltret bör göras snabbare än det slutna systemet. Välj exempelvis K-vektorn så att rekonstruktionen blir två gånger snabbare än det slutna systemet. Om systemet är brus känsligt får man se upp så att skattaren inte väljes för snabb. Båda polerna placerades i  $-4$ . Det diskretiserade Kalmanfiltret implementerades och testades. Rekonstruktionen av tillståndet  $T_h$  visas i figur 11 tillsammans med det verkliga tillståndet. Den skattade temperaturen överensstämmer mycket bra med den verkliga, och den skattade indikeringsfunktionen kommer alltså att bli mycket lik den exakta indikeringsfunktionen.

I verkligheten förekommer störningar, och det är ju av intresse att skattaren fungerar bra trots dessa störningar. Därför genomfördes en simulering då brus och laststörning lades på. Resultatet visas i figur 12. Laststörningens dåliga inverkan är uppenbar. Ett stationärt fel mellan den verkliga och den skattade temperaturen kvarstår, vilket leder till att den skattade indikeringsfunktionen blir fel då laststörningar förekommer i systemet. Detta kan ej tolereras. Lösningen på problemet är att införa ett utvidgat Kalmanfilter, som förutom tillstånden  $T_h$  och  $T_i$  också skattar laststörningen. Ett antagande som görs är att laststörningen  $l$  är styckvis konstant, d.v.s. att  $l' = 0$  utom vid vissa tillfällen. Tillståndsbeskrivningen av systemet då laststörning förekommer är:

$$x' = Ax + Bu + B_l l$$

$$y = Cx$$



Figur 12. Figuren visar (överst) den verkliga och den skattade temperaturen då systemet utsätts för last och mätstörningar och (nederst) laststörningen.

där

$$B_l = \begin{bmatrix} 0 \\ c \end{bmatrix}$$

Det utvidgade Kalmanfiltret får följande utseende:

$$\hat{z}' = \bar{A}\hat{z} + \bar{B}u + \bar{K}\bar{C}(z - \hat{z})$$

där

$$z = \begin{bmatrix} x \\ l \end{bmatrix}$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B_l \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C} = [ C \ 0 ]$$

Rekonstruktionsfelet blir:

$$\begin{aligned} \tilde{z}' &= z' - \hat{z}' \\ &= (\bar{A} - \bar{K}\bar{C})\tilde{z} + B_l l \end{aligned}$$

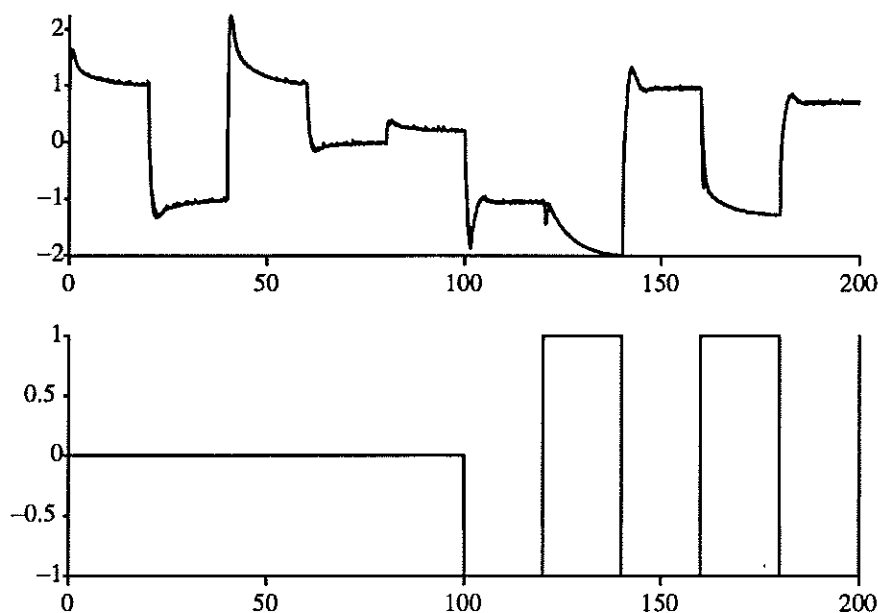
Efter en observerbarhetskontroll kan så ett diskretiserat utvidgat Kalmanfilter implementeras. Filtrets poler bestäms av:

$$\det(sI - (\bar{A} - \bar{K}\bar{C})) = 0$$

$$s^3 + s^2(2c + k_2 + g) + s(c(k_1 + k_2 + k_3) + g(c + k_2)) + ck_3(g + c) = 0$$

Man kan alltså välja pollägena genom att bestämma  $\bar{K}$ -vektorn. Möjligen får man vara beredd på att minska rekonstruktionsfiltrets snabbhet om brus





Figur 13. Skattningen av tillståndet som erhålls efter användning av det utvidgade Kalmanfiltret tillsammans med det verkliga tillståndet (överst) och laststörningen (nederst).

skulle bli för besvärande. De tre rekonstruktionspolerna placerades i  $-4$ . Den verkliga temperaturen  $T_h$  och den rekonstruerade temperaturen  $\hat{T}_h$  visas i figur 13.

Rekonstruktion med hjälp av Kalmanfilter förutsätter, som redan påpekats, att man känner processen. Ofta är processen okänd och då krävs ett annat sätt att bestämma indikeringsfunktionen än genom rekonstruktion av ugnshöljets temperatur  $T_h$ .

### Enkel skattning av indikeringsfunktionen

I det fall då processen är okänd kan inte Kalmanfiltrering användas för att skatta indikeringsfunktionen. En alternativ lite enklare skattning behövs då.

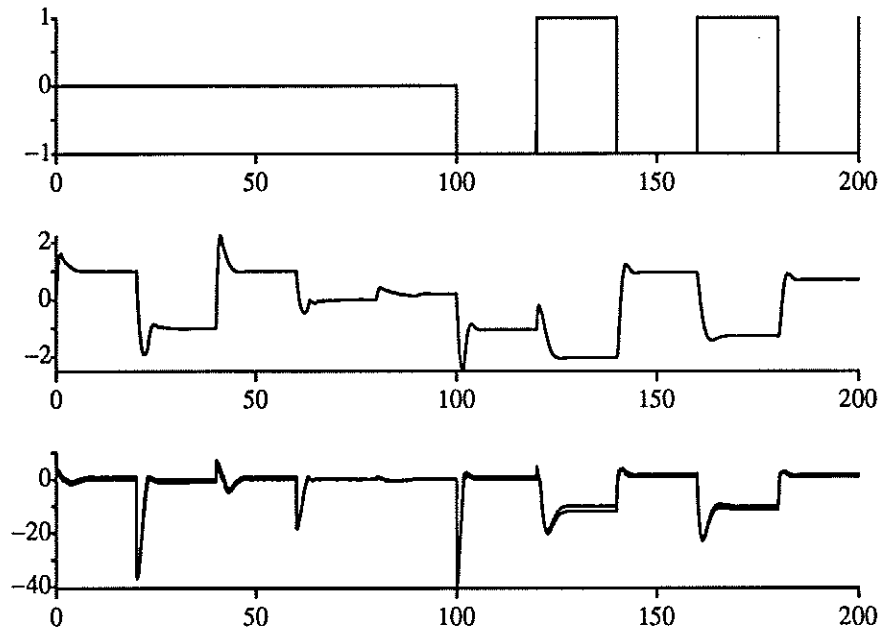
Man kan konstatera att det endast är hysterestetet hystest i reglerstrategin som förutsätter att  $a$  är känd. Således är referensvärdesändringar inga som helst problem men svårigheter uppstår då laststörningar träder in.

Indikeringsfunktionen har tidigare definierats som  $a = u - T_h$ . I figur 14 visas bl.a.  $u$  och  $a$ . Här framgår att  $a \approx u$ . Detta beror på att  $T_h \approx 0$ , samtidigt som variationerna i  $u$  är betydligt större än variationerna i  $T_h$  vid referensvärdesändringar och laststörningar.  $T_h$  varierar naturligtvis sällan runt 0, som i detta exempel. Däremot är det karaktäristiskt för denna typ av processer att variationerna i  $u$  är betydligt större än variationerna i  $T_h$ . Därför borde man kunna skatta  $a$  med

$$\hat{a} = u - u_0$$

där  $u_0$  är det stationära värdet på  $u$ , då laststörning inte existerar.  $T_h$  ersätts helt enkelt med  $u_0$ , som är medelvärdet av  $u$  under en längre tid, t.ex. 5-10 ggr integrationstiden.

Denna skattningsmetod fungerar tillräckligt bra då laststörningen är en puls som sakta klingar ut. Detta fall är nog också det vanligaste. Ugnen öppnas och ett kallt föremål förs in. Efter en stund har föremålet värmts upp och därmed har störningen klingat ut.



Figur 14. Överst visas  $l$ , i mitten visas  $T_h$  och nederst visas  $a$  och  $u$ .

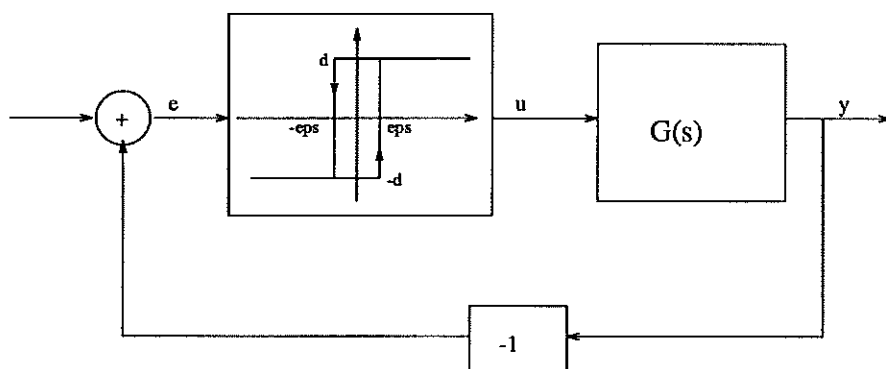
Det finns emellertid fall då laststörningen är stegformad, t.ex. om processen är kontinuerlig d.v.s. material passerar genom ugnen i en ström. I dessa fall kan man inte skatta  $u_0$  som ett medelvärde av  $u$ . Däremot kan man skatta  $u_0$  i förväg genom att köra ugnen utan laststörning och bestämma  $u_0$  som funktion av referensvärdet. Under drift kan sedan  $u_0(y_{ref})$  användas vid skattning av indikeringsfunktionen. För att ytterligare förbättra metoden i dessa osäkra fall skulle man kunna modifiera hysterestet. En ändring man skulle kunna göra är att man använder sig av ytterligare en regulatorparameteruppsättning då skattningen av  $a$  är osäker, d.v.s. då  $\hat{a}$  är liten.

## 5. Automatinställning av regulatorparametrarna

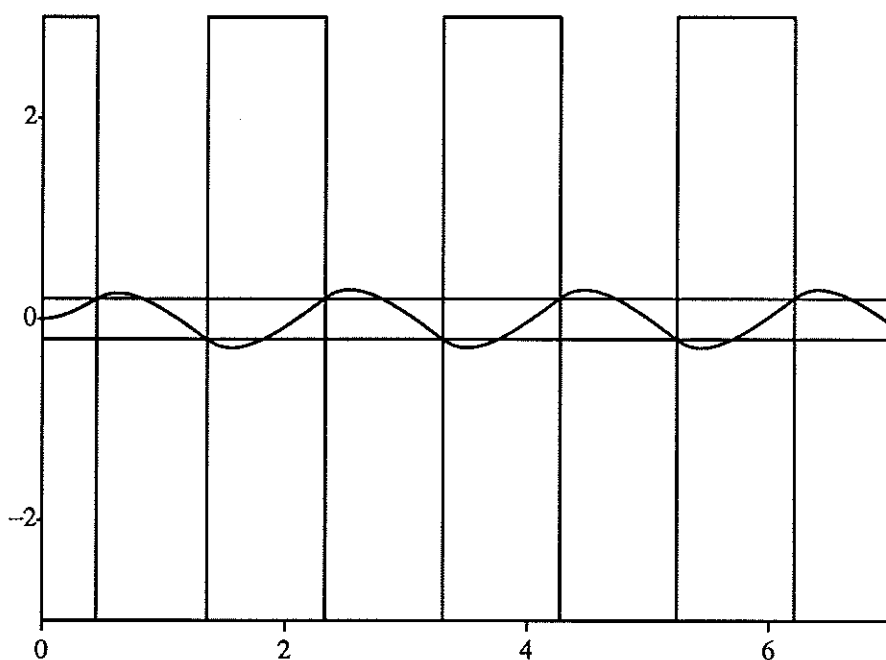
I kapitel 3 bestämdes en reglerstrategi utgående från att processdynamiken är känd, d.v.s. att  $c$ ,  $g_{heat}$  och  $g_{cool}$  är kända parametrar. I följande avsnitt skall dynamiken plockas fram genom att en testsignal skickas till processen och att svaret på denna testsignal analyseras. Testsignalen som används är en reläsignal.

### Relämetoden och beskrivande funktion

Den automatiska framtagningen av processdynamiken som finns idag och som fungerar bra för symmetriska processer kallas för autotuning med relämetoden [2]. Metoden går ut på att man skickar en reläsignal till processen. Svaret, i stationaritet, från processen approximeras med en sinussignal. Den approximativa sinussignalens amplitud och periodtid bestäms. Sen tar man hjälp av en s.k. beskrivande funktion för att bestämma en punkt på Nyquistkurvan. För vinkelfrekvensen, som motsvarar sinussignalens periodtid kan man alltså bestämma amplituden och fasförskjutningen, och därmed en punkt på Nyquistkurvan. Det bör kanske här påpekas att den framräknade punkten kommer att hamna lite vid sidan om processens verkliga Nyquistkurva, beroende på att reläsvaret inte är en exakt ren sinussignal utan bara är en approximativ



Figur 15. Blockschema vid relättest.



Figur 16. Reläsignalen och processens svar på denna signal

sådan. Figurerna 15 och 16 visar hur relätestet går till, samt hur man kan använda resultatet för att få fram dynamiken. Den beskrivande funktionen är definerad på följande sätt, förutsatt att reläfunktionen innehåller en hysteres:

$$-\frac{1}{N(A)} = -\frac{\pi}{4d} \sqrt{A^2 - \epsilon^2} - i \frac{\pi \epsilon}{4d}$$

Här är  $d$  är relästegets amplitud,  $\epsilon$  halva hystresbredden och  $A$  reläsvarets amplitud. Då  $A = A_0$  och  $\omega = \omega_0$  så blir beloppet av den beskrivande funktionen:

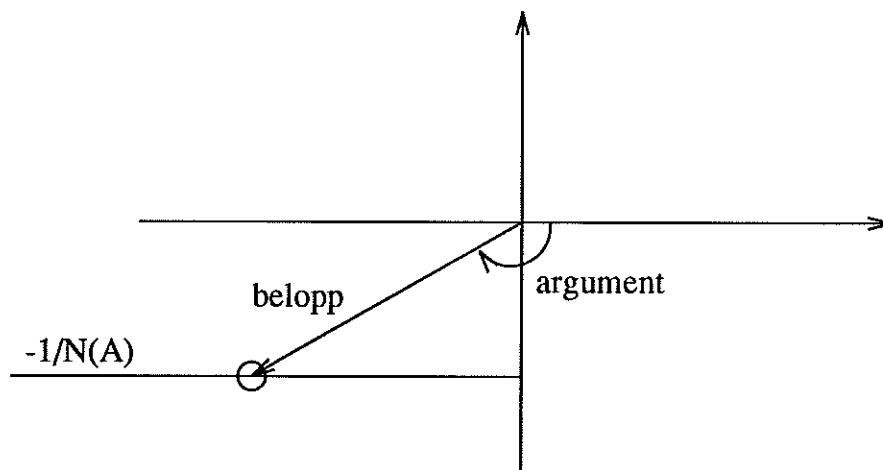
$$\frac{A_0 \pi}{4d}$$

och argumentet blir:

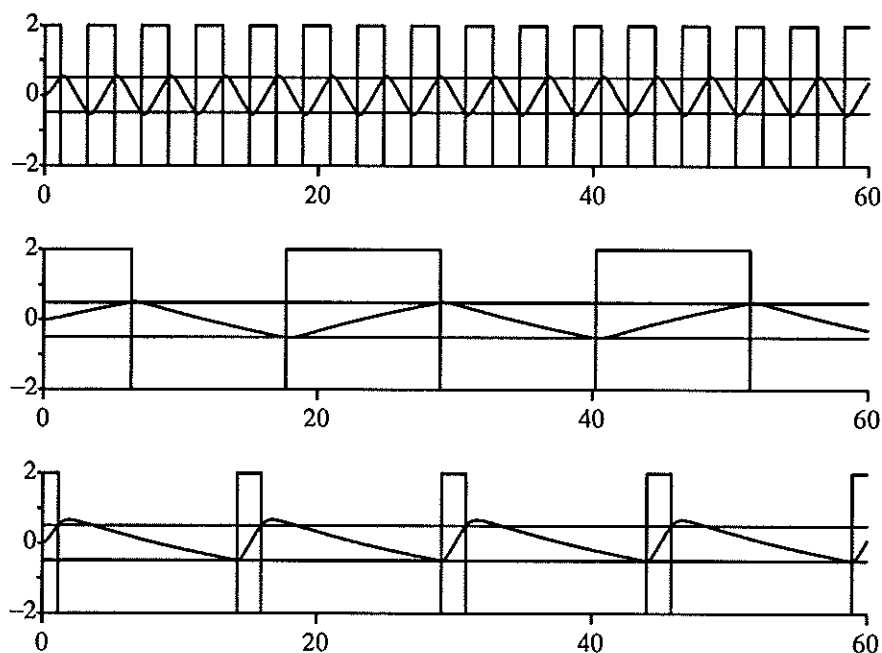
$$\arctan \frac{\epsilon}{\sqrt{A_0^2 - \epsilon^2}} - 180^\circ$$

Se den grafiska representationen i figur 17.

Nu är frågan om denna nyss beskrivna metod för framtagning av processdynamik är tillämpningsbar på osymmetriska processer, exempelvis på den

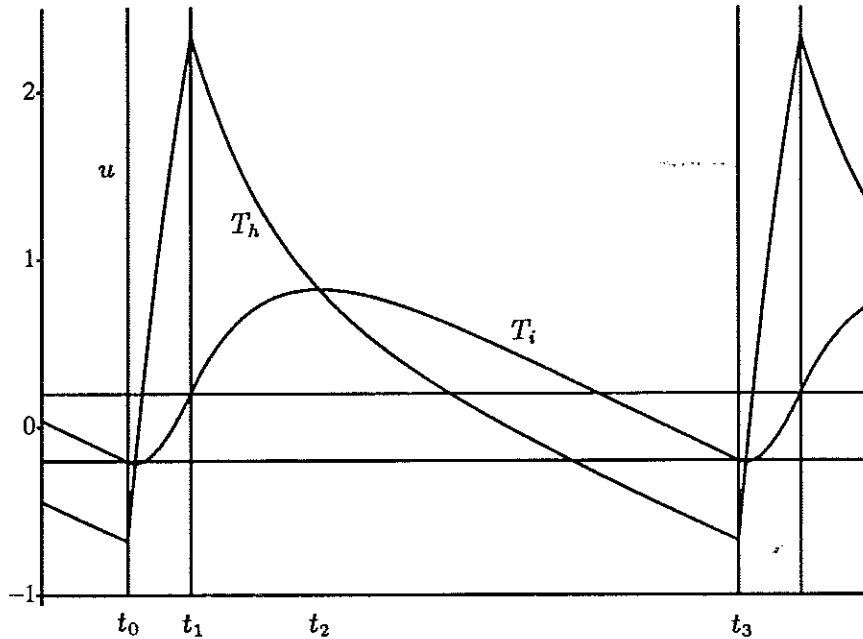


Figur 17. Den beskrivande funktionen samt dess belopp och argument då  $\omega = \omega_0$  och  $A = A_0$ .



Figur 18. Relättest av tre processer: process med enbart upphettningdynamik (överst), process med endast kyldynamik (mitten) och process med båda dynamikerna (nederst).

ugsprocessmodell som genomgående behandlas i denna rapport. Först gjordes relättest på enkel processdynamik, alltså med endast kyldynamiken och endast upphettningdynamiken var för sig. Dessa relättest blev som väntat helt symmetriska. Sen gjordes relättest på processen med sin verkliga, osymmetriska, dynamik. Detta relättest blev som väntat helt osymmetriskt. Simuleringarna, som här beskrivits, finns redovisade i figur 18. Vad som klart framgår av detta experiment är att de två periodtiderna, som fås fram när dynamikerna är enkla, inte överensstämmer med de två periodtider som fås när dynamiken är dubbel. Detta betyder att vi inte kommer att kunna bestämma en punkt på Nyquistkurvan för respektive dynamik med någon tillfredsställande precision. Det gäller sålunda att ta fram en alternativ metod till den som redan nu existerar för autotuning, vad gäller osymmetriska processer.



Figur 19. Relätest utfört på processmodellen,  $c = 1.0$ ,  $g_{cool} = 0.1$  och  $g_{heat} = 1.0$ . Reläet har  $d = 10$  och  $\varepsilon = 0.2$ .

### Modifierad relämetod

Idén för framtagning av en modifierad relämetod bygger på att studera reläsvaret från processmodellen, d.v.s. att studera tillståndens uppförande när en reläsignal skickas in till modellen. Tillståndet  $T_i$  är temperaturen inne i ugnen och alltså processens utsignal, vilken är mätbar, medan tillståndet  $T_h$ , höljets temperatur, är okänt i verkligheten. Det gäller nu att på något sätt ta fram en metod för att ta reda på processdynamiken, som bestäms av  $c$ ,  $g_{cool}$  och  $g_{heat}$ , när endast utsignalen är mätbar. Figur 19 visar relätestets utseende då processmodellen är den som beskrevs i kapitel 2. Modellens dynamikparametrar är bestämda till  $c = 1.0$ ,  $g_{cool} = 0.1$  och  $g_{heat} = 1.0$ .

Första tanken var att lösa problemet utan approximationer genom att helt enkelt lösa tillståndsekvationerna. Lösningen blir:

$$\mathbf{x}(t) = e^{A(t-t_0)}\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)}Bu(s)ds$$

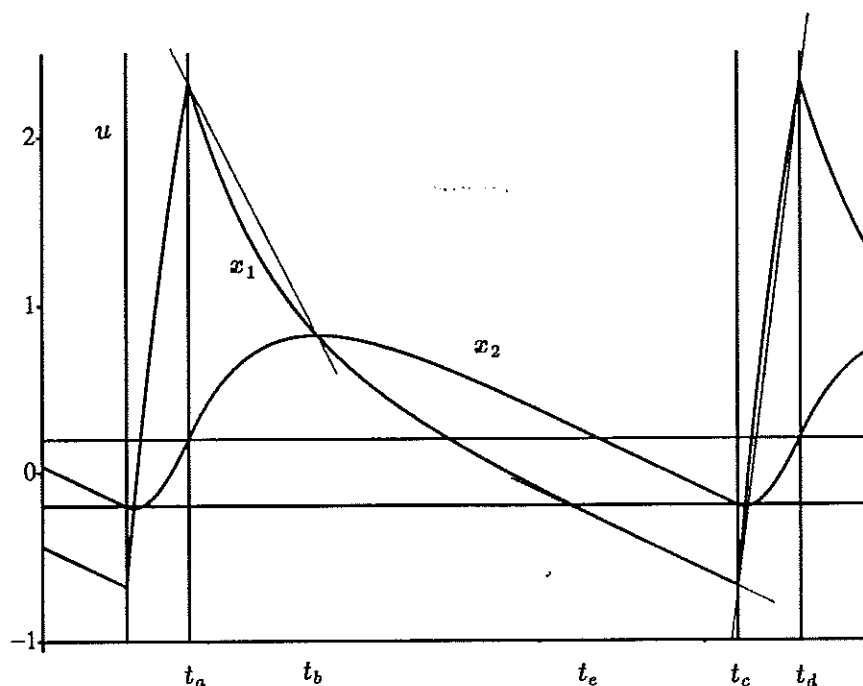
Genom att dela in reläsvaret i tre tidsintervall så skulle de tre obekanta parametrarna kunna lösas ut enligt:

$$\mathbf{x}(t_1) = e^{A(t_1-t_0)}\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} e^{A(t_1-s)}Bu(s)ds$$

$$\mathbf{x}(t_2) = e^{A(t_2-t_1)}\mathbf{x}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} e^{A(t_2-s)}Bu(s)ds$$

$$\mathbf{x}(t_3) = e^{A(t_3-t_2)}\mathbf{x}(t_2) + \int_{t_2}^{t_3} e^{A(t_3-s)}Bu(s)ds$$

Detta ekvationssystem innehåller egentligen sex ekvationer, eftersom  $\mathbf{x}$  är en vektor med två tillstånd, och fem obekanta,  $T_h(t_0) = T_h(t_3)$ ,  $T_h(t_1)$ ,  $c$ ,  $g_{cool}$  och  $g_{heat}$ . Det betyder att vi möjligen kan lösa ekvationssystemet exakt. Ekvationssystemet innehåller exponentialfunktioner där exponenterna är funktioner av



Figur 20. Relätest med införda approximationer.

de obekanta parametrarna och är således ett komplicerat system. Det blir därför en omöjlig uppgift att analytiskt lösa ekvationssystemet. I stället gäller det att på ett enklare och approximativt sätt bestämma dynamikparametrarna.

Att försöka komma fram till vettiga approximationer i det nyss uppställda ekvationssystemet är svårt, ty man saknar riktig kontroll över vad approximationerna får för betydelse. Därför är det säkrast att gå tillbaka till relätestet, figur 19, och tänka ut vettiga och förhoppningsvis generella approximationer för osymmetriska processer genom att analysera tillståndens utseende.

I figur 20 visas vilka approximationer som kommer i fråga. Mellan tidpunkterna  $t_a$  och  $t_b$  approximeras  $T_h$  med en rät linje. Denna linjes lutning kan anses vara ungefär  $T_h$ -derivatan i tidpunkten  $t_{ab}$ ,  $t_{ab} = (t_a + t_b)/2$ . Nästa approximation är att  $T_h$  är en ungefär rät linje mellan tiderna  $t_c$  och  $t_c$ . Denna linjelutningen är en approximation av derivatan i tidpunkten  $t_{cc}$ ,  $t_{cc} = (t_c + t_c)/2$ . Sista approximationen som görs är att  $T_h$  ersätts med en rät linje mellan tidpunkterna  $t_c$  och  $t_d$ . Linjens lutning är en approximation av  $T_h$ -derivatan i tidpunkten  $t_{cd}$ ,  $t_{cd} = (t_c + t_d)/2$ .

När väl alla approximationer är framtagna så skall åter uppmärksamheten riktas på processmodellens tillståndsbeskrivning.  $T_h$  har ersatts med  $x_1$  och  $T_i$  med  $x_2$ .

$$\begin{aligned}x_1'(t) &= -(c + g)x_1(t) + cx_2 + gu(t) \\x_2'(t) &= c(x_1(t) - x_2(t)) \\y(t) &= x_2(t)\end{aligned}$$

Med denna tillståndsbeskrivning och med tidigare redovisade approximationer kan  $\hat{c}$ ,  $\hat{g}_{cool}$  och  $\hat{g}_{heat}$  bestämmas på följande sätt:

$$\begin{aligned}x_1(t_a) &= \frac{y'(t_a) + \hat{c}y(t_a)}{\hat{c}} \\x_1(t_b) &= \frac{y'(t_b) + \hat{c}y(t_b)}{\hat{c}}\end{aligned}$$

$$x_1(t_{ab}) = \frac{y'(t_{ab}) + \hat{c}y(t_{ab})}{\hat{c}}$$

$$\begin{aligned} x_1'(t_{ab}) &= -(\hat{c} + g)x_1(t_{ab}) + \hat{c}x_2(t_{ab}) + \hat{g}u(t_{ab}) \\ &= -(\hat{c} + \hat{g})\frac{y'(t_{ab}) + \hat{c}y(t_{ab})}{\hat{c}} + \hat{c}y(t_{ab}) + \hat{g}u(t_{ab}) \\ &\approx \frac{x_1(t_a) - x_1(t_b)}{t_a - t_b} \end{aligned}$$

Samma förfarande upprepas för tidpunkterna  $t_{cd}$  och  $t_{ce}$ . Observera att  $g = g_{cool}$  och  $u = -d$  mellan tiderna  $t_a$  och  $t_c$ , men att  $g = g_{heat}$  och  $u = +d$  mellan tiderna  $t_c$  och  $t_d$ . Efter visst arbete med att lösa ut dynamikparametrarna erhöles följande formler:

$$\hat{c} = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{q}{a}}$$

där

$$\begin{aligned} a &= (t_e - t_c)(y(t_a)u_{min} - y(t_a)y(t_{ce}) - y(t_b)u_{min} + y(t_b)y(t_{ce})) \\ &\quad + y'(t_{ab})u_{min}(t_a - t_b) - y'(t_{ab})y(t_{ce})(t_a - t_b) \\ &\quad - (t_a - t_b)(y(t_e)u_{min} - y(t_e)y(t_{ab}) - y(t_c)u_{min} \\ &\quad + y(t_c)y(t_{ab}) + y'(t_{ce})u_{min}(t_e - t_c) - y'(t_{ce})y(t_{ab})(t_e - t_c)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= (t_e - t_c)(y'(t_a)u_{min} - y'(t_a)y(t_{ce}) - y(t_a)y'(t_{ce}) + y(t_b)y'(t_{ce})) \\ &\quad - y(t_{ab})y'(t_{ce})(t_a - t_b) - (t_a - t_b)(y'(t_e)u_{min} - y'(t_e)y(t_{ab})) \\ &\quad - y(t_e)y'(t_{ab}) - y'(t_c)u_{min} + y(t_c)y(t_{ab}) \\ &\quad + y(t_c)y'(t_{ab}) - y'(t_{ce})y'(t_{ab})(t_e - t_c) \end{aligned}$$

$$q = -(t_e - t_c)y'(t_a)y'(t_{ce}) + (t_a - t_b)(y'(t_e)y'(t_{ab}) - y'(t_c)y'(t_{ab}))$$

$$\hat{g}_{cool} = \frac{y'(t_a) + \hat{c}y(t_a) - \hat{c}y(t_b) + \hat{c}y'(t_{ab})(t_a - t_b)}{(t_a - t_b)(\hat{c}u_{min} - y'(t_{ab}) - \hat{c}y(t_{ab}))}$$

$$\hat{g}_{heat} = \frac{y'(t_c) + \hat{c}y(t_c) - y'(t_d) - \hat{c}y(t_d) + \hat{c}y'(t_{cd})(t_c - t_d)}{(t_c - t_d)(\hat{c}u_{max} - y'(t_{cd}) - \hat{c}y(t_{cd}))}$$

där  $u_{min} = -d$  och  $u_{max} = +d$ .

Formlerna för att bestämma parametrarna innehåller endast kända signaler, ty  $y(t)$  och  $y'(t)$  är ju ugnstemperaturen respektive dess derivata. Det som återstår är att göra ett program som automatiskt räknar ut parametrarna. Programmet måste detektera de aktuella tiderna och registrera utsignalen och dess derivata i dessa tidpunkter innan själva beräkningen kan göras. Programmet, som är skrivet i Simnonkod finns i appendix A. I det fall då processmodellens dynamikparametrar sattes till  $c = 1.0$ ,  $g_{cool} = 0.1$  och  $g_{heat} = 1.0$ , så gav den modifierade relämetoden  $\hat{c} = 1.09$ ,  $\hat{g}_{cool} = 0.10$  och  $\hat{g}_{heat} = 0.93$ . Metoden ger här alltså fel på mindre än 10%, vilket är acceptabelt.

## 6. Analys

I slutet på föregående kapitel redovisades resultatet av den modifierade relämetoden när den användes på processmodellen. Det är inte så konstigt att resultatet blev bra, ty metoden är ju uppbyggd utifrån ett relättest av processmodellen. Det är emellertid av intresse att metoden är tillfredsställande även om de verkliga processerna, inom rimliga gränser, skiljer sig från processmodellen. I det här kapitlet skall två analyser av den modifierade relämetoden utföras. Först redovisas en studie av hur graden av osymmetri inverkar på resultatet, och sedan testas metoden då den verkliga processens ordning är högre än modellens.

### Processer med varierande osymmetri

Den modifierade relämetoden är framtagen för att ge en bättre automatisk regulatorinställning vad beträffar osymmetriska processer. För symmetriska processer finns ju redan en bra metod, se avsnittet om relämetoden och den beskrivande funktionen. Det är naturligtvis av intresse att den modifierade metoden fungerar trots att den verkliga processen är betydligt mer symmetrisk än processmodellen.

Ett försök utfördes med en process vars parametrar sattes till  $c = 1.0$ ,  $g_{cool} = 0.1$  och  $g_{heat} = 0.5$ . Resultatet blev  $\hat{c} = 1.094$ ,  $\hat{g}_{cool} = 0.099$  och  $\hat{g}_{heat} = 0.479$ , vilket fortfarande är mycket bra. Därefter gjordes ytterligare ett försök. Då sattes  $c = 1$  och  $g_{cool} = g_{heat} = 0.1$ , d.v.s. en helt symmetrisk process. Här blev resultatet något sämre:  $\hat{c} = 1.37$  och  $\hat{g}_{cool} = \hat{g}_{heat} = 0.095$ . Efter ytterligare några tester framgick mönstret klart. Metoden fungerar sämre ju mer symmetrisk den verkliga processen är.

### Högre ordningens processer

Processmodellen som ligger till grund för den modifierade relämetoden är av andra ordningen. Det är intressant att undersöka hur metoden fungerar om den verkliga processen är av högre ordning. En studie har gjorts vad beträffar metodens robusthet då processen är av tredje ordningen. Följande tillståndsbeskrivning har använts för att beskriva en tredje ordningens process:

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} -(g+c) & c & 0 \\ c & -(b+c) & b \\ 0 & b & -b \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \ 0 \ 1] \mathbf{x}$$

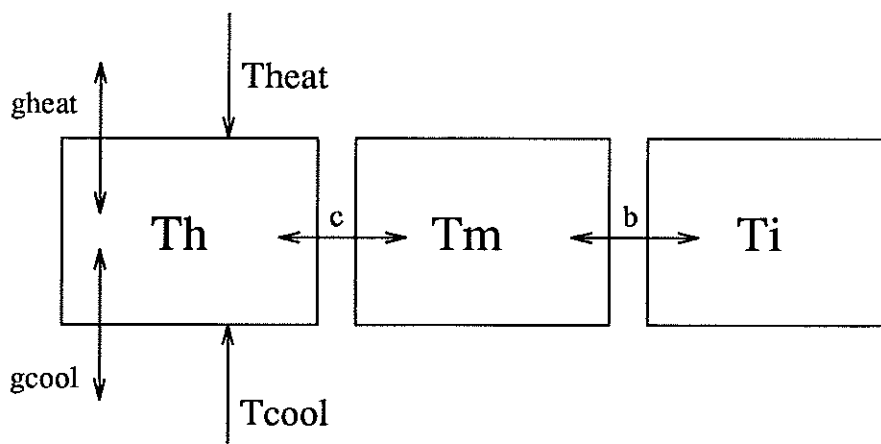
En mycket enkel bild av processen visas i figur 21.

Det extra tillståndet kan vara att ugnen består av ytterligare ett skikt, eller att ett föremål finns i ugnen och det är dess temperatur som skall regleras.

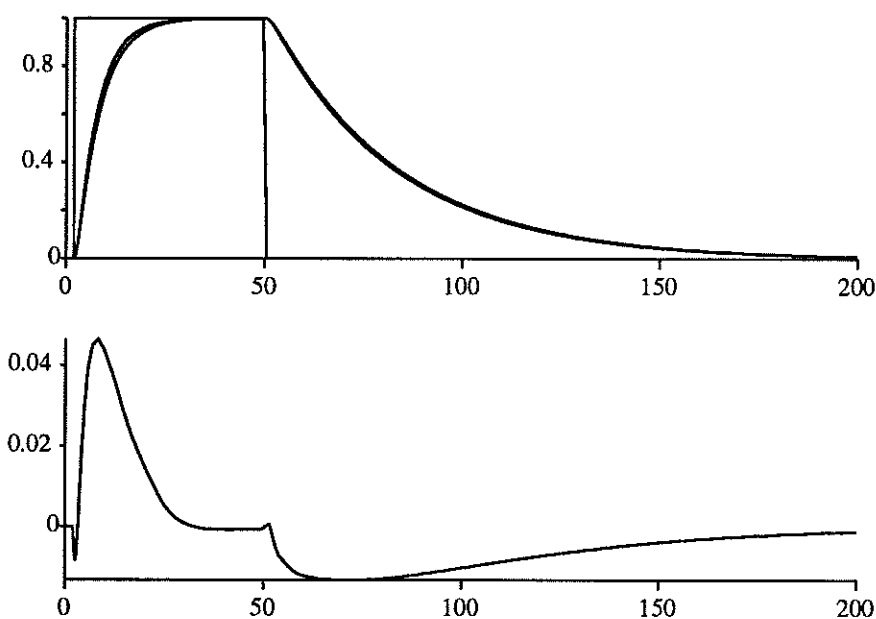
För att få en uppfattning om metodens robusthet så har stegvarsanalys och frekvensanalys utförts. Eftersom den verkliga processen är av tredje ordningen och den modifierade relämetoden approximerar den verkliga processen med en andra ordningens process så kan man inte jämföra de verkliga dynamikparametrarna och de skattade dynamikparametrarna direkt utan jämförelsen måste ske indirekt.

Stegvarsanalysen går till på följande sätt: Ett steg skickas in på den verkliga tredje ordningens processen. Det stegsvar som då erhålls jämförs med stegsvaret man erhåller efter att processmodellen, med  $\hat{c}$ -,  $\hat{g}_{cool}$ - och





Figur 21. Enkel bild av tredje ordningens process.

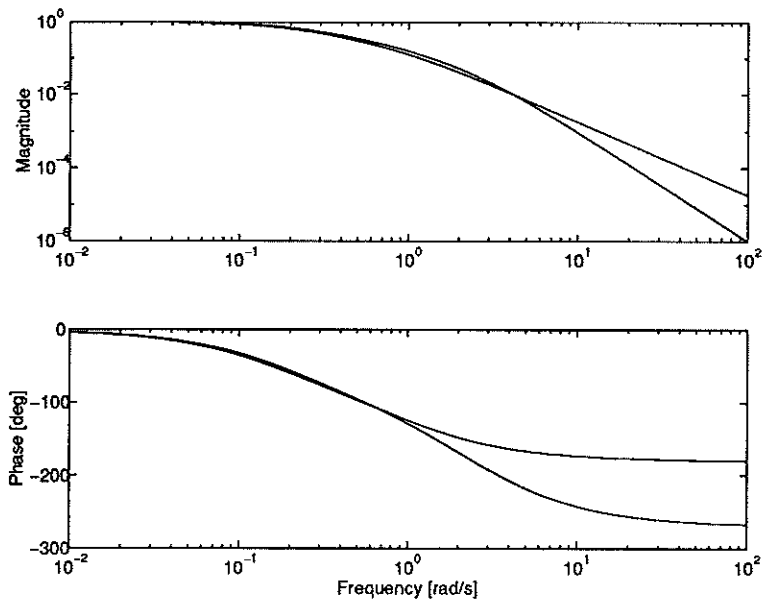


Figur 22. Överst visas stegsvaret från den verkliga tredje ordningens processen och stegsvaret från andra ordningens approximation av den verkliga processen. Nederst visas differansen mellan de två stegsvaren.

$\hat{g}_{heat}$ -värden enligt den modifierade relämetoden, utsatts för en stegändring. Naturligtvis är det önskvärt att stegsvaren ser mycket lika ut. Det tyder i så fall på att metoden är bra även för tredje ordningens system.

En frekvensanalys genomförs också. Bodediagram för den verkliga processen och för processmodellen, med  $\hat{c}$ -,  $\hat{g}_{cool}$ - och  $\hat{g}_{heat}$ -värden enligt den modifierade relämetoden, ritas och jämförs. Dessa bodediagram skall helst se lika ut för så många frekvenser som möjligt, ty det tyder också på att metoden är robust för tredje ordningens processer.

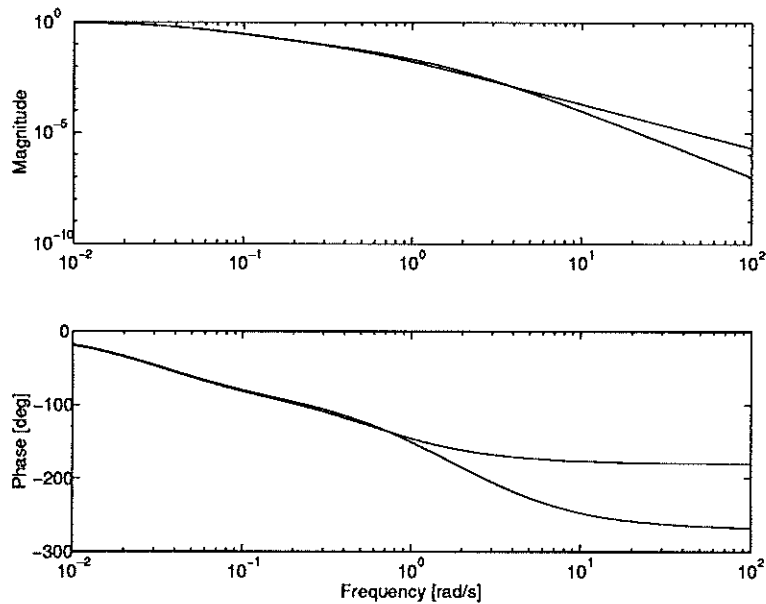
I figur 22 visas stegsvaren då de verkliga dynamikparametrarna är  $c = b = 1.0$ ,  $g_{cool} = 0.1$  och  $g_{heat} = 1.0$ , och de uträknade dynamikparametrarna är  $\hat{c} = 0.308$ ,  $\hat{g}_{cool} = 0.065$  och  $\hat{g}_{heat} = 0.590$ . Bodediagrammen som är gjorda med samma dynamiska parametrar visas i figurerna 23 och 24. Stegsvaren är mycket lika, likaså bodediagrammen, fränsett de höga frekvenserna. Det ser alltså ut som om den modifierade relämetoden är robust också för tredje ordningens system.



Figur 23. Bodediagram för upphettningsdynamik. Bodediagrammet som hör till den verkliga processen är det som bryter ner mest både vad gäller fas och amplituddiagram.

### Sammanfattning

Analysen visar att trots att den verkliga processen skiljer sig rätt så rejält från processmodellen, som ligger till grund för den modifierade relämetoden, så blir resultatet efter ett relättest inte alls så dåligt. Att resultatet blir så pass bra kan man intuitivt förstå om man tänker på vad som ligger till grund för den modifierade relämetoden. Idén var ju, som tidigare deklarerats, att



Figur 24. Bodediagram för kylningsdynamik. Bodediagrammet som hör till den verkliga processen är den som bryter ner mest både vad gäller fas och amplituddiagram.

hitta karaktäristiska händelser vad gäller tillståndens utseende då processen var en osymmetrisk uppvärmningsprocess. Dessa karaktäristiska händelser låg till grund för de approximationer som gjordes för att kunna lösa ut de tre dynamiska processparametrarna med den modifierade relämetoden. Studerar man händelseförloppet, vad gäller tillståndens utseende efter ett relättest då den verkliga processen är mer symmetrisk eller är av högre ordning, så blir karaktären inte identisk men ungefär densamma som efter ett relättest av modellen. Alltså: Trots att processerna skiljer sig från modellen så har de samma karaktär och den modifierade relämetoden fungerar därför tillfredsställande även i dessa fall.

## 7. Sammanfattning

I detta examensarbete har en ny reglerstrategi tagits fram för att reglera osymmetriska processer, exempelvis ugnar. Reglerstrategin bygger på parameterstyrning, där bl.a. en indikeringsfunktion avgör vilka regulatorparametrar som skall användas. Denna indikeringsfunktion är oftast okänd, och måste därför skattas på något sätt. Två metoder för att skatta indikeringsfunktionen har presenterats.

Utöver en ny reglerstrategi så har också en metod för bestämning av processdynamik tagits fram. Metoden bygger på att processen utsätts för en reläåterkoppling. Svaret på denna reläsignal ligger sedan till grund för framtagandet av processens dynamik.

Examensarbetets två delar, reglerstrategi och framtagning av processdynamik kan användas tillsammans. Då erhåller man en regulator för osymmetriska processer som automatiskt ställer in sig, vilket var målet med detta examensarbete.

## 8. Referenser

- [1] Per Persson. *Towards Autonomous PID Control* Institutionen för regler-teknik LTH. Rapport TFRT-1037 1992.
- [2] K.J Åström och T. Hägglund. *Automatic Tuning of PID Controllers*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina 1988.

## Bilaga A. Programlistning

Här följer utskrifter av simnonkoder. De fyra första koderna används för att simulera reglerstrategin, som är en slags parameterstyrning. Den sista koden är programmet för den modifierade relämetoden. Denna kod används för att bestämma processens dynamikoefficienter.

### Parameterstyrningen

#### CONTINUOUS SYSTEM process

"en ugn som beskrivs av ett andra ordningens system  
"filnamn process.t

```
INPUT  u last
OUTPUT yp a
STATE  x1 x2
DER    dx1 dx2
```

```
yp=x2
```

```
dx2=c*(x1-x2)+c*last
a=u-x1
```

```
g=if a<0 then gcool else gheat
```

```
dx1=-(g+c)*x1+c*x2+g*u
```

```
"----- parametrar-----"
```

```
gcool: 0.1
gheat: 1
c: 1
```

```
END
```

#### DISCRETE SYSTEM brus

"filnamn brus.t  
"koden genererar ett normalfördelat brus

```
TIME t
TSAMP ts
OUTPUT noise
```

```
noise =NORM(t)/300
```

```
ts=t+h
h=0.05
```

```
END
```

DISCRETE SYSTEM ninreg

"filnamn ninreg.t  
"parameterstyrning plus en del extra utrustning  
"regulatorn är av inkrementell typ

TIME t  
INPUT yref a yp noise  
OUTPUT u y  
STATE yrefold yold yoldold uold aold  
STATE Kold Tiold "Tdold  
NEW nyrefold nyold nyoldold nuold naold  
NEW nKold nTiold "nTdold  
TSAMP ts

y=yp+noise

"-----tester och parameterbyte-----"

Ktest=IF abs(Kold-Kcool)<1 THEN 1 ELSE 0

hystest=IF aold<-1 OR (Ktest>0.5 AND aold<1) THEN 1 ELSE 0

"-----"

deltay=yref-yrefold

ytest=IF deltax<-0.1 THEN 1 ELSE IF deltax>0.1 THEN -1 ELSE 0

ner=IF ytest>0.5 AND yold>yref THEN 1 ELSE 0

upp=IF ytest<-0.5 AND yold<yref THEN -1 ELSE 0

sktest=IF ner>0.5 THEN 1 ELSE IF upp<-0.5 THEN -1 ELSE 0

"-----"

nskift=IF sktest>0.5 OR (sktest>-0.5 AND hystest>0.5) THEN 1 ELSE 0

uskift=IF sktest<-0.5 OR (sktest<0.5 AND hystest<0.5) THEN -1 ELSE 0

slut=IF nskift>0.5 THEN 1 ELSE IF uskift<-0.5 THEN -1 ELSE 0

"-----"

K=IF slut>0.5 THEN Kcool ELSE IF slut<-0.5 THEN Kheat ELSE Kold

Ti=IF slut>0.5 THEN Ticool ELSE IF slut<-0.5 THEN Tiheat ELSE Tiold

"Td=IF slut>0.5 THEN Tdcool ELSE IF slut<-0.5 THEN Tdheat ELSE Tdold

"-----beräkningar som ligger till grund för styrsignalen-----"

deltaP=K\*(b\*yref-y-b\*yrefold+yold)

```

deltaI=K*h*(yref-y)/Ti
"deltaD=-K*Td*(y-2*yold+yoldold)/h
"-----stysignal-----

deltau=deltaP+deltaI"+deltaD

v=uold+deltau

u=v          "IF v<umin THEN umin ELSE IF v<umax THEN v ELSE umax
"-----uppdatering-----

nyoldold=yold
nyold=y
nyrefold=yref
nuold=u
naold=a

ts=t+h

nKold=K
nTiold=Ti
"nTdold=Td

"-----regulatorparametrar-----

Kheat: 3.46
Tiheat: 1.4
"Tdheat: 0

Kcool: 17.7
Ticool: 2.84
"Tdcool: 0

"-----parametrar-----

h: 0.05
N: 10
b: 1

umin: -150
umax: 150

END

```

CONNECTING SYSTEM connect

"skall binda ihop ugnprocessen med den diskreta  
"och inkrementella parameterstyrningsregulatorn  
"mätbruset kopplas också in här  
"filnamn connect.t

TIME t

"-----yref fyrkant-----

"yref= IF MOD(t,per)<per/2 THEN step ELSE -step

"-----yref mer komplicerad-----

r1 =IF t>80 THEN 0 ELSE IF MOD(t,per)<per/2 THEN step ELSE -step  
r2 =IF t>60 THEN step ELSE 0  
r3 =IF t>80 THEN -0.75 ELSE 0  
r4 =IF t>100 THEN -2.25 ELSE 0  
r5 =IF t>120 THEN step ELSE 0  
r6 =IF t>140 THEN step ELSE 0  
r7 =IF t>160 THEN -0.25 ELSE 0  
r8 =IF t>82 THEN -0.05 ELSE 0

yref =r1 +r2 +r3 +r4 +r5 +r6 +r7 +r8

"-----laststörning-----

last =IF t<100 THEN 0 ELSE IF MOD(t,per)<per/2 THEN step ELSE -step

"-----

last[process]=last

a[ninreg]=a[process]

yref[ninreg]=yref

u[process]=u[ninreg]

yp[ninreg]=yp[process]

noise[ninreg]=noise[brus]

"-----parametrar-----

per: 40

step: 1

END

## Modifierade relämetoden

```
DISCRETE SYSTEM nyrelay
"filnamn nyrelay.t
"relä med hysteres
"bestämning av processdynamik med den modifierade relämetoden
"tidsdetekteringen är mycket känslig

TIME t
INPUT yref y dy
OUTPUT u
STATE uold vot1old ot1old vot2old ot2old ptimeold
STATE ampold vomampol omampold vomiamo omiampol eold starold clocold
STATE clo1old clo2old clomaold clomiold
STATE aflagg ta dyta
STATE bflagg tb
STATE ytab dytab
STATE cflagg tc dytc
STATE ytc d dytc
STATE eflagg te dyte
STATE ytce dytce
NEW nuold vot1 ot1 vot2 ot2 ptime
NEW amp vomamp omamp vomiamo omiamp neold nstarold nclocold
NEW clo1 clo2 cloma clomi
NEW naflagg nta ndyta
NEW nbflagg ntb
NEW nytab ndytab
NEW ncflagg ntc ndytc
NEW nytcd ndytcd
NEW neflagg nte ndyte
NEW nytce ndytce

TSAMP ts

e=yref-y

"-----reläfunktionen-----

utest=IF abs(uold+d)<d THEN 1 ELSE 0
hystest=IF e<-eps OR (utest>0.5 AND e<eps) THEN 1 ELSE 0

u=IF hystest>0.5 THEN -d ELSE d "u skiftar mellan d och -d

"-----periodbestämning-----

omslag=IF u*uold<0 THEN 1 ELSE 0
test1=IF omslag>0.5 AND e<eold THEN 1 ELSE 0

vot1old:10 "initialv. vad som helst

vot1=IF test1>0.5 THEN ot1old ELSE vot1old
ot1= IF test1>0.5 THEN ptimeold+h ELSE ot1old
```



```

clo1=IF abs(vot1-ot1)<0.01 THEN clo1old ELSE clo1old+h
t1=IF abs(vot1-ot1)<0.01 THEN ot1 ELSE 0           "ena halvan av
                                                    "periodtiden
test2=IF omslag>0.5 AND e>eold THEN 1 ELSE 0
vot2old:10                                         "initialv. vad som helst
vot2=IF test2>0.5 THEN ot2old ELSE vot2old
ot2=IF test2>0.5 THEN ptimeold+h ELSE ot2old
clo2=IF abs(vot2-ot2)<0.01 THEN clo2old ELSE clo2old+h
t2=IF abs(vot2-ot2)<0.01 THEN ot2 ELSE 0           "andra halvan av
                                                    "periodtiden
ptime=IF omslag>0.5 THEN 0 ELSE ptimeold+h
clo=MAX(clo1,clo2)
"-----amplitudbestämning-----
noll=IF e*eold<0 THEN 1 ELSE 0
testma=IF noll>0.5 AND e<eold THEN 1 ELSE 0
vomampol:10                                         "initialv. vad som helst
vomamp=IF testma>0.5 THEN omampold ELSE vomampol
omamp=IF testma>0.5 THEN ampold ELSE omampold
cloma=IF abs(vomamp-omamp)<0.01 THEN clomaold ELSE clomaold+h
maxamp=IF abs(vomamp-omamp)<0.01 THEN omamp ELSE 0   "extremvärde
testmi=IF noll>0.5 AND e>eold THEN 1 ELSE 0
vomiampo:10                                         "initialv. vad som helst
vomiamp=IF testmi>0.5 THEN omiampol ELSE vomiampo
omiamp=IF testmi>0.5 THEN ampold ELSE omiampol
clomi=IF abs(vomiamp-omiamp)<0.01 THEN clomiold ELSE clomiold+h
minamp=IF abs(vomiamp-omiamp)<0.01 THEN omiamp ELSE 0 "extremvärde
amp=IF noll>0.5 OR abs(e)>ampold THEN abs(e) ELSE ampold
clom=MAX(cloma,clomi)
"-----

```

```

period=t1+t2                                "periodtiden

cloc=MAX(clo,clom)

star=IF abs(cloc-clocold)<0.01 THEN cloc ELSE 0

"----detektering av tider, utsignalen och dess derivata-----

"---ta---

pricka=IF abs(y-eps)<0.01 AND dy>0 THEN 1 ELSE 0
naflagg=IF pricka>0.5 AND star>0 THEN 1 ELSE aflagg
nta=IF (star-starold)>0.01 THEN star ELSE IF aflagg>0.5 THEN ta ELSE ta+h

tida=IF abs(nta-ta)<0.01 THEN nta ELSE 0

yta=eps

ndyta=IF abs(nta-ta)<0.001 THEN dyta ELSE dy

"---tb---

prickb=IF abs(y-minamp)<0.01 THEN 1 ELSE 0
nbflagg=IF prickb>0.5 AND star>0 THEN 1 ELSE bflagg
ntb=IF (star-starold)>0.01 THEN star ELSE IF bflagg>0.5 THEN tb ELSE tb+h

tbprim=IF abs(ntb-tb)<0.01 THEN ntb ELSE 0
tidb=IF tbprim<tida THEN tbprim+period ELSE tbprim

ytb=minamp

dytb=0

"---tab---

tidab=(tida+tidb)/2
pertidab=tidab+period

nytab=IF t>pertidab THEN ytab ELSE y

ndytab=IF t>pertidab THEN dytab ELSE dy

"---tc---

prickc=IF abs(y+eps)<0.01 THEN 1 ELSE 0
ncflagg=IF prickc>0.5 AND star>0 THEN 1 ELSE cflagg
ntc=IF (star-starold)>0.01 THEN star ELSE IF cflagg>0.5 THEN tc ELSE tc+h

tcprim=IF abs(ntc-tc)<0.01 THEN ntc ELSE 0
tidc=IF tcprim<tida THEN tcprim+period ELSE tcprim

ytc=negeps

```

```

ndytc=IF abs(ntc-tc)<0.001 THEN dytc ELSE dy
"---td---

tidd=tida+period

ytd=eps

dytd=dyta

"---tcd---

tidcd=(tidc+tidd)/2
pertidcd=tidcd+period

nytcd=IF t>pertidcd THEN ytcd ELSE y

ndytcd=IF t>pertidcd THEN dytcd ELSE dy

"----te----

pricke=IF abs(y-eps)<0.01 AND dy<0 THEN 1 ELSE 0
neflagg=IF pricke>0.5 AND star>0 THEN 1 ELSE eflagg
nte=IF (star-starold)>0.01 THEN star ELSE IF eflagg>0.5 THEN te ELSE te+h
teprim=IF abs(nte-te)<0.01 THEN nte ELSE 0
tide=IF teprim<tida THEN teprim+period ELSE teprim

yte=eps

ndyte=IF abs(nte-te)<0.01 THEN dyte ELSE dy

"---tce-----

tidce=(tidc+tide)/2
pertidce=tidce+period

nytce=IF t>pertidce THEN ytce ELSE y

ndytce=IF t>pertidce THEN dytce ELSE dy

"-----uppdatering-----

nstarold=star
nclocold=cloc
nuold=u
neold=e
ts=t+h

"-----parametrar-----

h: 0.01

```

```

d: 10
eps: 0.2
negeps: -0.2
posu: 10           "=+d
negu: -10          "=-d

"-----beräkning av de dynamiska koefficienterna -----

"---c-koeff.-----

a1=(tide-tidc)*(yta*negu-yta*ytce-ytb*negu+ytb*ytce)
a5=(tide-tidc)*dytab*negu*(tida-tidb)
a2=(tide-tidc)*(-dytab*(tida-tidb)*ytce)
a3=(tida-tidb)*(yte*negu-yte*ytab-ytc*negu+ytc*ytab)
a6=(tida-tidb)*dytce*(tide-tidc)*negu
a4=(tida-tidb)*(-dytce*(tide-tidc)*ytab)

a=a1+a5+a2-a3-a6-a4

b1=(tide-tidc)*(dyta*negu-dyta*ytce-yta*dytce+ytb*dytce)
b4=(tide-tidc)*ytab*dytce*(tida-tidb)
b2=(tida-tidb)*(dyte*negu-dyte*ytab-yte*dytab-dytc*negu+dytc*ytab)
b3=(tida-tidb)*(ytc*dytab-dytce*(tide-tidc)*dytab)

b=b1-b4-b2-b3

q=-dyta*dytce*(tide-tidc)+dyte*dytab*(tida-tidb)-dytc*dytab*(tida-tidb)

rot=IF a>0.0001 OR a<-0.0001 THEN sqrt(b/(2*a))-q/a ELSE 0

c=IF rot>0 THEN -b/(2*a)+sqrt(rot) ELSE 0
"-----

"---gcool-koeff.-----

namn1=c*negu*(tida-tidb)-(dytab+c*ytab)*(tida-tidb)
talj1=dyta+c*yta-c*ytb+c*dytab*(tida-tidb)

gcool=IF namn1>0.001 OR namn1<-0.001 THEN talj1/namn1 ELSE 0
"-----

"---gheat-koeff.-----

namn2=c*posu*(tidc-tidd)-(tidc-tidd)*(dytcd+c*ytcd)
talj2=dytc+c*ytc-dytd-c*ytd+c*(tidc-tidd)*dytcd

gheat=IF namn2>0.001 OR namn2<-0.001 THEN talj2/namn2 ELSE 0
"-----

END

```

