

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5357/1-42/(1986)

Olika metoder för autotuning  
av PID-regulatorer  
–Implementering och tester

Ray Mauritsson  
Mats Grahn

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
November 1986

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET

UTLÄNAS EJ

<b>Department of Automatic Control</b> <b>Lund Institute of Technology</b> P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		Document name Master Thesis	
		Date of issue November 1986	
		Document Number CODEN: LUTFD2/(TFRT-5357)/1-42/(1986)	
Author(s) Ray Mauritsson and Mats Grahn		Supervisor Karl Johan Åström	
		Sponsoring organisation	
Title and subtitle Olika metoder för autotuning av PID-regulatorer. Implementering och tester. Different methods for autotuning of PID-controllers. Implementation and tests.			
Abstract <p>The purpose of this work has been to implement and test a couple of different autotuners for PID-control. It is partly based on results shown in a paper by T. Lindquist 1985.</p> <p>The tests have been made on a real process and the results are shown after the theoretical description of the different tuners. The advantages and disadvantages are put together and some proposals of further development work are given.</p>			
Key words			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			
ISSN and key title			ISBN
Language Swedish	Number of pages 42	Recipient's notes	
Security classification			

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.

OLIKA METODER FÖR AUTOTUNING AV PID-REGULATORER.  
IMPLEMENTERING OCH TESTER.

Examensarbete vid Alfa-Laval hösten 1986

Av Ray Mauritsson och Mats Grahn

Handledare: tekn. dr. Lars Pernebo  
tekn. dr. Tore Hägglund  
civ. ing. Ulf Hagberg  
prof. Karl Johan Åström

### Sammanfattning

Avsikten med detta examensarbete var att implementera och testa ett antal olika algoritmer för autotuners till PID-regulatorer. Till grund för delar av arbetet ligger de resultat som T. Lindquist redovisat i sitt examensarbete 1985. Testerna har gjorts på en verklig process och resultaten redovisas efter den teoretiska beskrivningen av de olika tuning principerna. Därefter redovisas en sammanställning med för och nackdelar för de olika principerna samt vissa förslag till fortsatt arbete.

### Abstract

The purpose of this work has been to implement and test a couple of different autotuners for PID-control. It is partly based on results shown in a paper by T. Lindquist 1985. The tests have been made on a real process and the results are shown after the theoretical description of the different tuners. The advantages and disadvantages are put together and some proposals of further development work are given.

## Innehållsförteckning

	sid.
1. Bakgrund.	1
2. Teoretisk beskrivning.	
2.1 Åström-Hägglunds metod, relämetoden.	3
2.2 Autotuner baserad på stegsvarsanalys.	6
2.3 Foxboros metod.	10
3. Försöksuppställning	
3.1 Processbeskrivning.	12
3.2 Beskrivning av testerna.	13
4. Testresultat.	
4.1 Test av relämetoden.	14
4.2 Test av stegsvarsmetoden, öppen loop.	20
4.3 Test av stegsvarsmetoden, sluten loop.	25
4.4 Test av Foxboros metod.	29
4.5 Test kaskadreglering.	31
5. Sammanställning av testresultat.	33
6. Förslag till vidare arbete.	38
7. Referenser.	39

## 1. Bakgrund

Den i industrin helt dominerande regulatorn är PID. Med en riktig inställning av proportional-, integral- och derivatadel är denna regulator för de allra flesta tillämpningar i processindustrin helt tillfredställande. Det visar sig dock att en stor del av dessa regulatorer skulle kunna ställas in betydligt bättre och därmed förbättra den aktuella processens funktion.

De tumregelmässiga metoder som finns för manuell inställning av regulatorparametrar kräver relativt stor processkänedom och är mycket tidskrävande. Följden av detta blir att de flesta regulatorer endast trimmas in en gång i samband med uppstarten av processen. En mängd olika faktorer som slitage, ändrad produktionsnivå etc. gör att de flesta processer ändrar sig med tiden. Det vore alltså i många fall önskvärt med en återkommande trimning av regulatorparametrar.

### Autotunern

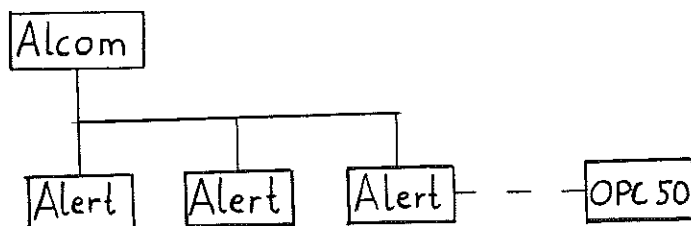
För att en regelbunden trimning av regulatorer skall vara möjlig måste den ske utan för stora processtörningar och vara lätt för operatören att utföra. Tunern skall automatiskt på order från operatören på något sätt identifiera processen och därefter designa nya lämpliga regulatorparametrar.

### Vad har vi?

Alfa Laval säljer ett processtyrssystem som kallas Alert 50, detta kan användas för direkt digital reglering av ett hundratal enkla reglerloopar av PID-typ. För operatörskommunikation samt konfiguration av Alert 50 används en Dec Professional persondator med en programvara som kallas Alcom.

I Alert 50 sker sampling och lagring av mätvärden samt utstyrning av styrsignaler. Information skickas seriellt till Alcom för presentation, fig.1. Denna kombination av Alcom och Alert 50 lämpar sig alltså väl för att förverkliga den princip för en autotuner som beskrivits ovan.

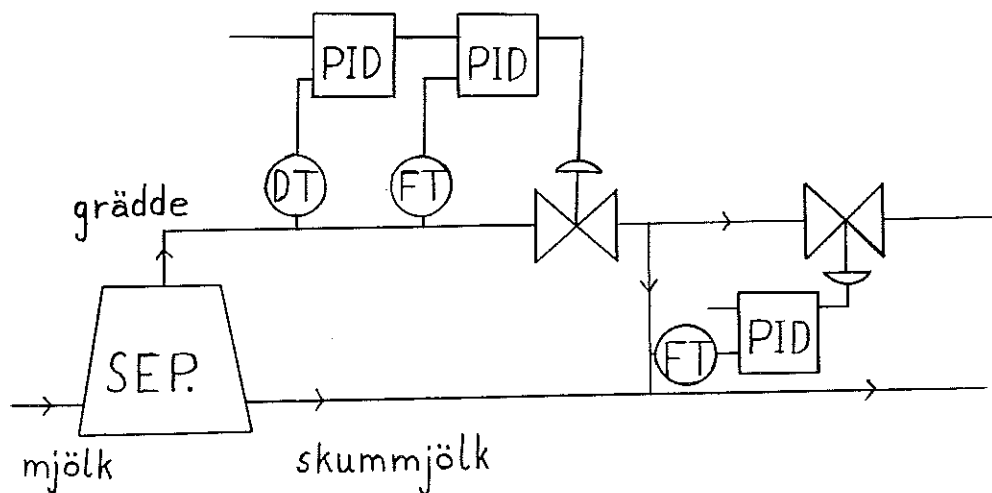
fig.1



### Hur ser Alfa Laval's processer ut?

De hos Alfa Laval vanligast förekommande reglerlooparna är temperatur, tryck, flöde och i viss mån densitetsloopar. Bland dessa förekommer både snabba loopar, några sekunder, och långsamma loopar, flera minuter. Det förekommer processer med och utan dödtid. Nedan följer några exempel på typiska reglersituationer i Alfa Laval's processer.

fig. 2



Den pastöriserade mjölken separeras och därefter tillverkas grädde och mjölk med bestämda fetthalter. Vi har här exempel på både snabba loopar utan tidsfördröjning, de två flödeslooparna, och en långsam loop med tidsfördröjning, densitetsloopen.

En annan vanlig process är pastören som fungerar ungefär så som den process vi har byggt upp för våra tester. I pastören låter man ånga i en värmväxlare värma cirkulerande vatten som i sin tur i en annan värmväxlare värmer produkten. Detta sker för att undvika vidbränning av produkten. En närmare beskrivning av denna process ges i kapitel 3.1, Processbeskrivning.

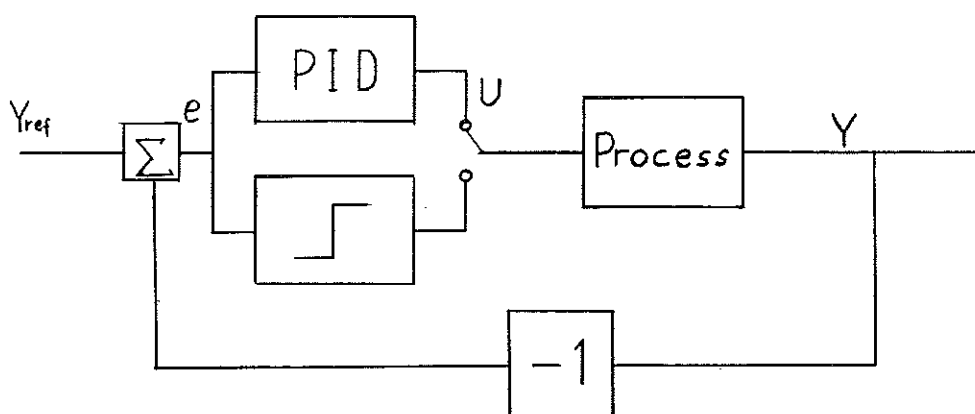
## 2.1 Teoretisk beskrivning

### 2.1 Åströms- och Hägglunds metod

Ziegler och Nichols regler för inställning av PID-parametrar bygger på kännedom om den kritiska förstärkningen samt egenfrekvensen. Grundidén med den av Åström och Hägglund föreslagna autotunern är att bestämma amplitudmarginalen,  $A_m$ , och periodtiden då processen tvingas i svängning. Denna svängning fås genom att en krets med reläkaraktär kopplas in i processens återkopplingsringa, fig.3.

Nedan kommer de två delarna identifiering respektive design för denna grundide att beskrivas. Det skall nämnas att metoden utvecklats och förfinats betydligt utöver detta i kommersiellt tillgängliga system.

fig.3 Relämetoden, principskiss



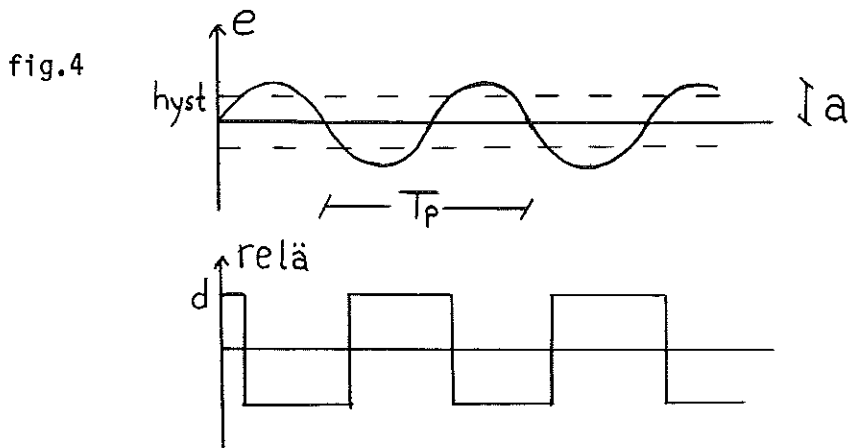
### Identifiering

En identifiering startas genom att regulatorn kopplas ur och ersätts med en krets med reläkaraktär. Felet,  $e$ , kommer då att bli en periodisk signal med perioden,  $T$ . En Fourierserieutveckling av utsignalen från reläet ger första termen  $4*d/\pi$  där  $d$  är reläamplituden, fig.4,5. Om nu svängningens amplitud bestäms till  $a$  så kan den kritiska förstärkningen approximeras som

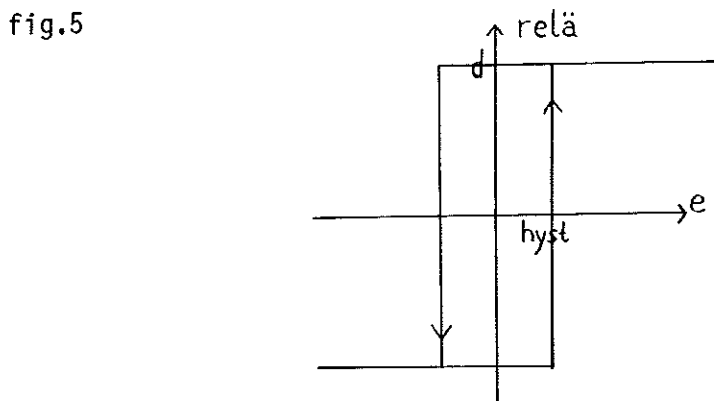
$$A_m = \frac{4 * d}{\pi * a} \quad (1)$$

Periodtiden bestäms enklast genom att mäta tiden mellan ett antal nollgenomgångar för felet,  $e$ . Amplituden bestäms helt enkelt genom att detektera max- och minvärde av felet.





Reläfunktionen är känslig för brus så för att minska inverkan av mätbrus användes ett relä med hysteres, fig.5.



Storleken av hysteresen väljes med hänsyn till det brus som uppmätts i processen. Denna mätning görs automatiskt innan processen sätts i svängning.

### Design

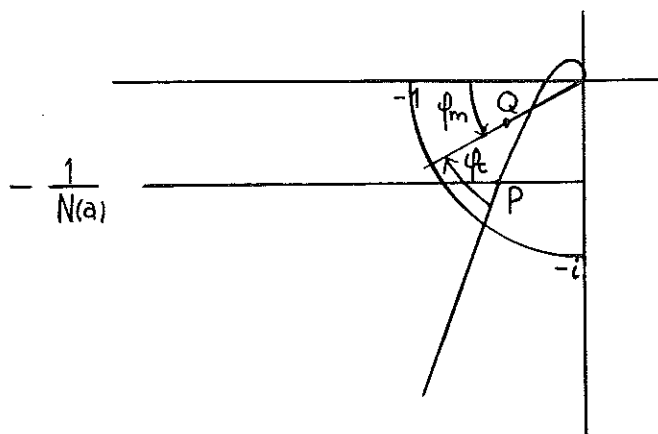
När en punkt på Nyquistkurvan för det öppna systemet är känd kan man med PID-reglering flytta denna punkt till en godtycklig punkt i det komplexa planet.

Vi betraktar en process med överföringsfunktionen  $G(s)$ . Den negativa inversen av den beskrivande funktionen för reläet kan skrivas:

$$\frac{-1}{N(a)} = \frac{-\pi}{4*d} * \sqrt{a^2 - hyst^2} - i * \frac{\pi * hyst}{4 * d} \quad (2)$$

Vi har nu identifierat punkten P, fig.6. Som designmål har vi valt att fasmarginalen skall vara lika med  $\varphi_m$  och förstärkningen 0.5 för det kompenserade systemet vid  $\omega_c$ . Punkten P skall alltså flyttas till punkten Q mha. regulatorn. Regulatorn bör då "vrida" Nyquistkurvan en vinkel  $\varphi_c$ .

fig.6



Regulatorn kan skrivas:

$$G_c(s) = K_c * \left( 1 + s * T_d + \frac{1}{s * T_i} \right) \quad (3)$$

ur fig 6. fås

$$\varphi_c = \varphi_m - \arcsin\left(\frac{\text{hyst}}{a}\right) \quad (4)$$

mha. (3) fås sedan

$$\varphi_c = \arg G_c(i * \omega_c) = \arctan\left(\omega_c * T_d - \frac{1}{\omega_c * T_i}\right) \quad (5)$$

Om vi väljer att låta

$$T_i = \alpha * T_d \quad (\alpha = 6.25 \text{ enligt Åström, Hägglund}) \quad (6)$$

fås sedan ur (4)

$$T_d = \frac{\tan \varphi_c + \sqrt{\frac{4}{\alpha} + \tan^2 \varphi_c}}{2 * \omega_c} \quad (7)$$

Därefter väljes  $K_c$  så att förstärkningen blir 0.5 för det kompenserade systemet vid  $\omega_c$ . Detta ger

$$K_c = 0.5 * A_m * \cos \varphi_c \quad (8)$$

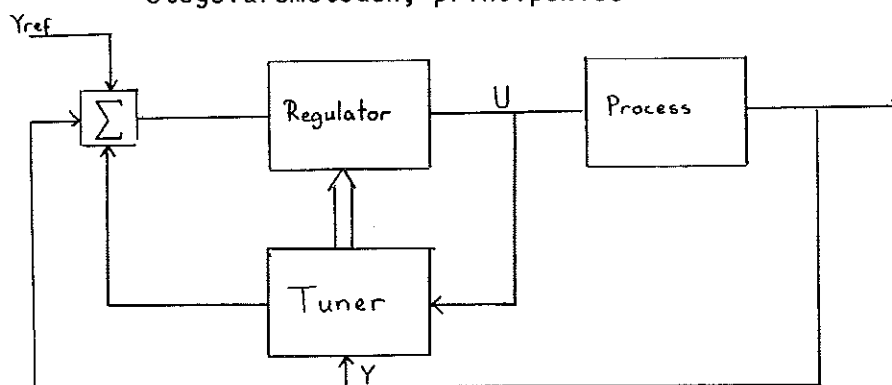
## 2.2 Autotuner baserad på stegvarsanalys

Metoden kan, ur operatörens synvinkel, användas dels till att få PID-parametrar initialt när processen är helt okänd, dels till att modifiera parametrarna t.ex. då processen ändrats något. Översiktligt fungerar metoden på följande sätt:

1. Vi samplar processens svar på en test-insignal, i detta fall ett steg.
2. De samplade värdena används för att beräkna vissa karakteristiska värden för processen.
3. Ur dessa karakteristiska värden beräknas PI-parametrar.

I de följande styckena kommer identifieringen, som motsvaras av punkt 1 och 2 ovan, och designmetoden, punkt 3, att beskrivas närmare. Identifieringen bygger på metoder beskrivna i Y. Nischikawas artikel medan designmetoden är baserad på T. Lindströms examensarbete 1985. (Se referenslistan)

fig.7 Stegvarsmetoden, principskiss



### Identifieringen

Identifieringen kan göras på två olika sätt, antingen i öppen eller i sluten loop. När processen är helt okänd sker identifieringen i öppen loop, d.v.s. vi samplar processens utsignal när ett steg läggs på dess insignal och utför beräkningarna på dessa värden.

Har vi redan en regulator med någorlunda fungerande parametrar inkopplad sker identifieringen i sluten loop och steget läggs istället på börvärdet till regulatorn varefter både processens och regulatorns utsignal samplas.

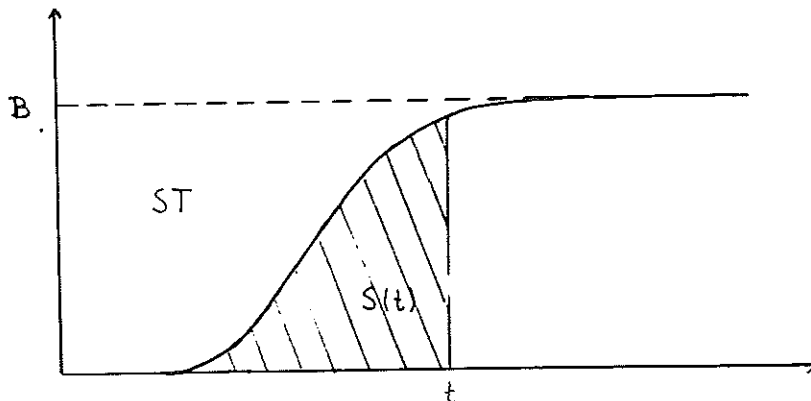
I öppen loop fungerar identifieringen på följande sätt: Först läggs ett försteg på insignalen till processen och tiden fram till dess att processens utsignal är stabil mätes, varefter insignalen återgår till ursprungsvärdet. Försteget görs för att få en uppfattning om processens tidskala och därmed kunna sprida ut det begränsade antal mätvärden vi samplar över hela stegsvaret. När processens utsignal återgått till det värde den hade innan

försteget lägger vi på det steg vi identifierar processen ur under den tid som bestäms av försteget och mätvärdena samplas. Processens överföringsfunktion approximeras med en första ordningens överföringsfunktion:

$$G_p(s) = \frac{K_p * \exp(-L*s)}{1 + T * s} \quad (9)$$

De parametrar vi söker vid identifieringen är alltså processförstärkningen  $K_p$ , dödtiden  $L$  och tidskonstanten  $T$ .

fig.8



Vi definierar de karakteristiska areorna  $ST$  och  $S(t)$ , se fig.8, på följande sätt med beteckningar ur fig.7.

$$ST = \int_0^{\infty} (Y(\infty) - Y(v)) dv \quad (10)$$

$$S(t) = \int_0^t Y(v) dv \quad (11)$$

Nu kan  $K_p$  bestämmas som  $B / A$  där  $A$  är det pålagda steget och  $B = Y(\infty)$ .

$ST$  ger summan av dödtid och tidskonstant:

$$TT = T + L = ST / B \quad (12)$$

eftersom  $ST = B * L + B * \int_0^{\infty} \exp(-t / T) dt = B * (L + T)$ .

När  $TT$  är bestämd kan  $S(TT)$  beräknas och därefter kan  $T$  och  $L$  bestämmas som:

$$T = e * S(TT) / B \quad (13)$$

$$L = TT - T$$

Dessa formler är hämtade ur Y. Nishikawas artikel, se referenser.

I slutna loop gör vi på följande sätt. Ett steg läggs på regulatorns börvärde och processens utsignal samt styrsignalen samplas tills utsignalen stabiliserats på det nya börvärdet.

Med beteckningar från fig.7. beräknas följande integraler:

$$SY = \int_0^{\infty} (Y(\infty) - Y(v)) dv \quad (15)$$

$$SU = \int_0^{\infty} (U(\infty) - U(v)) dv \quad (16)$$

$$SYX = \int_0^{\infty} \exp(-\mu v) * (Y(\infty) - Y(v)) dv \quad (17)$$

Tidsviktningsen  $\mu$  väljes som  $\mu = 4 / (T + L)$ , se Lindquists "En autotuner..." referenslistan.

T och L tages från föregående identifiering gjord antingen i slutna eller öppna loop.

En teoretisk härledning av ovanstående integraler ger följande ekvationer.

$$SY = \frac{B * Ti}{Kp * Kc} \quad (18)$$

$$SU = \frac{B}{Kp} * \left( \frac{Ti}{Kp * Kc} - T - L \right) \quad (19)$$

$$SYX = \frac{B}{\mu} * \frac{1}{1 + Kp * Kc * \left( 1 + \frac{1}{Ti * \mu} \right) * F(\mu)} \quad (20)$$

$$\text{där } F(\mu) = \frac{\exp(-L * \mu)}{1 + Ti * \mu}$$

Vi söker som innan  $Kp$ ,  $T$  och  $L$ .

$Ti$  och  $Kc$  är den under identifieringen arbetande regulatorns parametrar.  $Kp$  löses direkt ur (18). Ur (19) löses  $T$  i  $L$  varefter  $L$  löses numeriskt ur (20) och därmed är systemet identifierat.

### Design av regulatorn

Modellen av processen  $G(s)$  överföres genom normalisering  $s' = s * L$  till  $G'(s')$ .

$$G(s) = \frac{K_p * \exp(-L * s)}{1 + T * s} \quad (21)$$

$$G'(s) = \frac{K_p * \exp(-s')}{1 + (T / L) * s'} \quad (22)$$

Processen beskrivs alltså av kvoten  $T / L$ . Ovanstående resonemang är tillsammans med tabell 1 hämtat ur Lindquists undersökningar där han för hand ställt in önskvärda regulatorer för olika värden på  $T / L$ .

Tabell 1. Interpoleringstabell för bestämning av  $K_c$  och  $T_i$

$T / L$	$K_c * K_p$	$T_i / L$
0.1	0.16	0.3
0.4	0.32	0.6
1.0	0.46	1.04
10.0	4.0	10.0

Vi interpolerar direkt i tabellen för att bestämma  $K_c$  och  $T_i$ . Snyggaste interpoleringen får vi genom att anpassa polynom,  $K(X)$  och  $T(X)$ , där  $X = \log(T / L)$ , till  $\log(K_c * K_p)$  och  $\log(T_i / L)$ .

$$K(X) = \frac{-0.796 + 0.502 * (X + 1) - 0.107 * (X + 1) * (X + 1)}{(X + 0.4) + 0.248 * (X + 1) * (X + 0.4) * X} \quad (23)$$

$$T(X) = \frac{-0.523 + 0.502 * (X + 1) + 0.095 * (X + 1) * (X + 1)}{(X + 0.4) + 0.0904 * (X + 1) * (X + 0.4) * X} \quad (24)$$

I tabell 1 observeras att interpolationen är begränsad till området  $0.1 \leq T / L \leq 10$  men detta är vid processer aktuella för Alfa-Laval ingen begränsning enligt T. Lindquist.

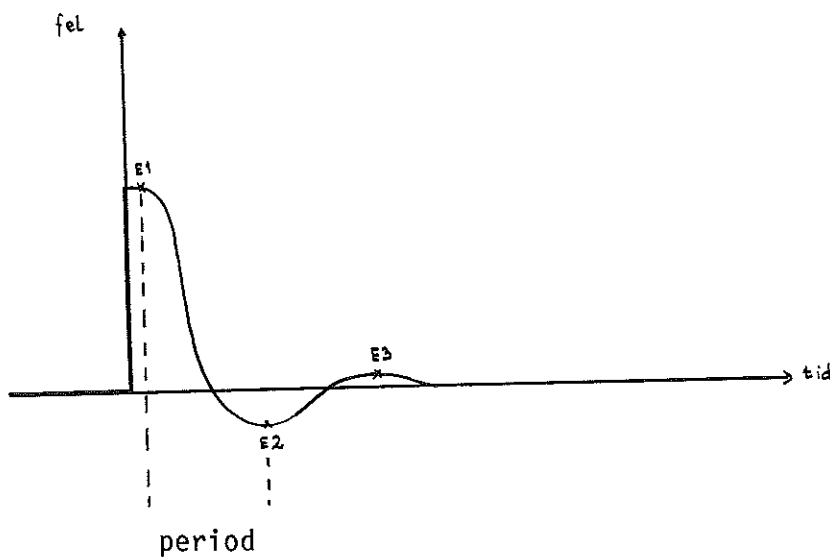
### 2.3 Foxboro-metoden

Foxboros metod är en självinställande PID-regulator i den meningen att vid varje börvärdesändring eller tillräckligt stor störning beräknas nya PID-parametrar ur mätsignalens utseende. Dessa parametrar beräknas så att de minimerar inställningstiden efter en störning med hänsyn till den översläng och dämpning som specificerats av användaren.

#### Identifieringen

När felet överstiger ett visst värde, bestämt av brusnivån, initieras autotuningen. Algoritmen väntar på ett extremvärde hos felet och när detta uppträder startas en klocka för att mäta periodtiden mellan på varandra följande toppar. När tre toppar detekterats beräknas översläng, dämpning och nämnda periodtid. Om inte tre toppar kan detekteras nöjer man sig med en eller två och ger de saknade "pseudovärden" för att ändå kunna designa regulatorn.

fig.9



$$\text{översläng} = -E2 / E1$$

$$\text{dämpning} = \frac{-(E3 - E2)}{E1 - E2}$$

### Design av regulatorn

Till en början sätts P- och D-delen med hjälp av den uppmätta perioden men P-, I- och D-delarna påverkar varandra och därför måste P-delen ändras vid påföljande ändringar av I och D.

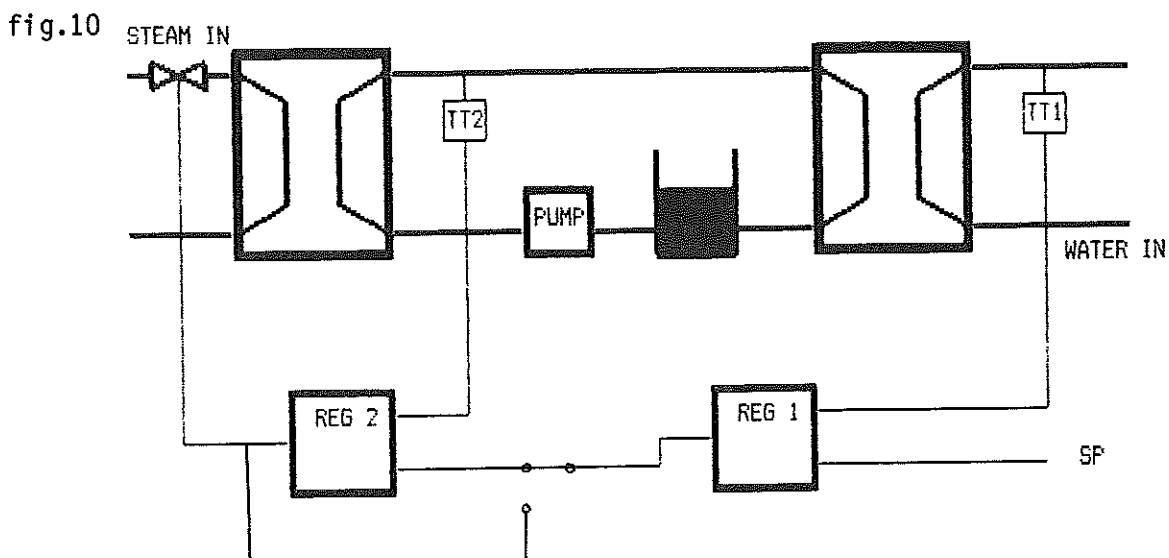
Ziegler-Nichols utvecklade 1942 en metod att justera I- och D-delarna tills I / period och D / period fick bestämda värden. I Foxboros metod ändras även dessa bestämda värden vilket, enligt Foxboro, ger snabbare konvergens och bättre tuning. Om man inte hittat alla tre topparna används istället dämpningen och överslängen för att bestämma I- och D-delen. Till sist jämförs dämpningen och överslängen med de max- resp minvärden användaren bestämt och parametrarna justeras eventuellt igen. Designmetoden är med andra ord ett s.k expertsystem med mycket "ingenjörskunskap" nerplöjd.



### 3 Försöksupställning

#### 3.1 Processbeskrivning

För att testa de olika tuningmetoderna byggde vi upp en process bestående av två stycken plattvärmväxlare kopplade enligt fig.10 nedan.



Värmväxlare använda på detta sätt kan man t.ex. finna i mejerier där man vid pastörisering inte vill "direktvärma" mjölken då man i ett sådant fall skulle riskera vidbränning. De reglerloopar vi använt är dels REG1 utan REG2, dels REG2 utan REG1 vilket ger oss en relativt snabb och en långsammare loop. I diagram 1, REG1, resp. diagram 2, REG2, ser vi hur processen reagerar då ett steg lägges på styrsignalen. Dödtiden för REG1 är ungefär 10 sek och för REG2 ungefär 6 sek. Vi konstaterar också att båda looparna har två tidskonstanter där den långsammare härhör från uppvärmning av det cirkulerande vattnet. Vidare har vi bestämt processförstärkningen till ungefär 0.2 för den långsammare REG1 och till ungefär 0.3 för den snabbare loopen, REG2. Ett i processen inbyggt problem är att konstant ventilöppning inte ger konstant ångflöde då ångpannans effekt varierar. Denna variation ger vid normal börvärdesreglering skillnader i styrsignalen på upp till 25% av maximal signal.

diagram 1 Processdynamik för den långsamma loopen, REG1

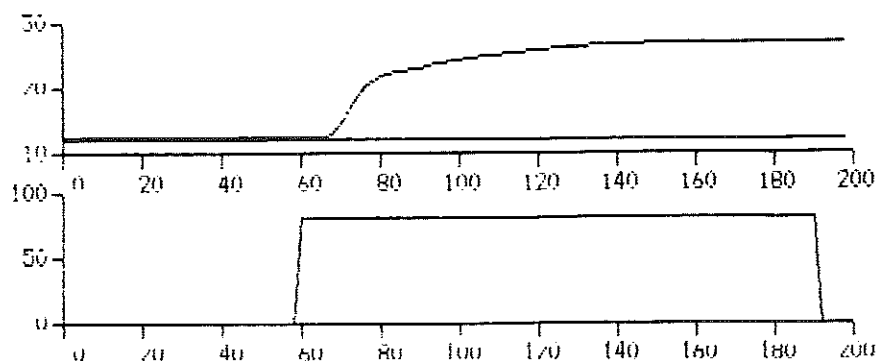
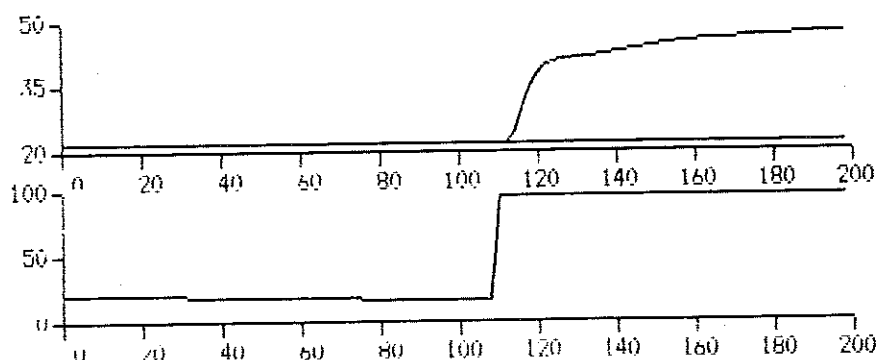


diagram 2 Processdynamik för den snabba loopen, REG2



### 3.2 Beskrivning av testerna

Vid identifieringen har vi till en början provat hur mycket vi måste störa processen för att kunna identifiera densamma med tillräcklig noggrannhet. Vad som varierats är amplituden på de testsignaler som används samt i något fall den tid testsignalen ligger ute.

Efter detta har vi bestämt oss för en viss amplitud och tid och sedan gått vidare med ett test av robustheten. Med robusthet menar vi här hur mycket tunerns identifiering varierar vid upprepade körningar med samma utgångsläge ifråga om processens tillstånd och eventuella initialvärden. Vi har vidare testat om tunern för vår aktuella process ger olika resultat i olika driftsfall.

Vi har också gjort en normaltuning och därefter lagt på en börvärdesändring för att se hur bra de framräknade parameterna är. Till sist har vi lagt på tre olika laststörningar under identifieringen. Vi har tillfört varmt eller kallt vatten i cirkulationskretsens tank samt gjort identifieringen när ångpannans tryck sjunker som mest.

Avslutningsvis gjordes även en designtest med kaskadreglering. I nästa kapitel redovisas testresultaten för respektive metod och därefter följer en jämförelse mellan metoderna.

## 4 Testresultat

### 4.1 Test av relämetoden

#### Identifiering

Till att börja med undersökte vi hur mycket processen behöver störas för att få en lyckad tuning. De parametrar som påverkar detta är antalet perioder, hysteresen samt reläamplituden. Hysteresen bestäms ur den brusmätning som görs före varje tuning,  $\text{hyst} = 0.3$  resp.  $0.2^\circ\text{C}$  för REG1 resp. REG2. Reläamplituden valde vi till 10% av styrsignalens utstyrningsområde. Det visade sig vidare att fem halvperioder var tillräckligt för en lyckad identifiering. Detta gav en identifieringstid, exklusive brusmätning, på 80 resp. 35 sek för REG1 resp. REG2.

#### Robusthet

Undersökningen av identifieringens robusthet gav följande resultat

tabell 2 Relämetoden, tre identiska test, långsam loop

REG1	test 1	test 2	test 3
period, $T_p$ (sek)	32.0	29.8	30.8
amplitud, $a$ ( $^\circ\text{C}$ )	1.2	1.3	1.3

tabell 3 Relämetoden, tre identiska test, snabb loop

REG2	test 1	test 2	test 3
period, $T_p$ (sek)	13.4	14.0	13.2
amplitud, $a$ ( $^\circ\text{C}$ )	1.8	1.8	1.8

Detta måste betraktas som en mycket robust identifiering.

#### Driftsfallsberoende

För att undersöka om regulatorparametrarna kunde förbättras med en förnyad tuning vid en ny driftsnivå gjordes en tuning kring en normalnivå. Därefter undersöktes skillnader i stegsvar från tre olika driftsfall. För REG1 kunde vi inte notera några skillnader men för REG2 fick vi ett förbättrat stegsvar på den lägre driftsnivån efter en ny tuning där, diagram 3a-c.

diagram 3a Relämetoden, REG2, stegsvar efter tuning på normalnivå

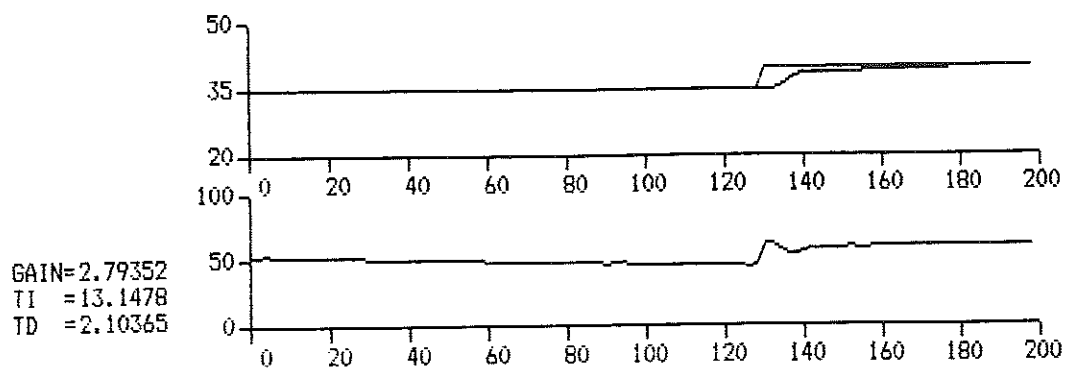


diagram 3b Relämetoden, REG2, stegsvar på lägre driftsnivå efter tuning på normalnivån

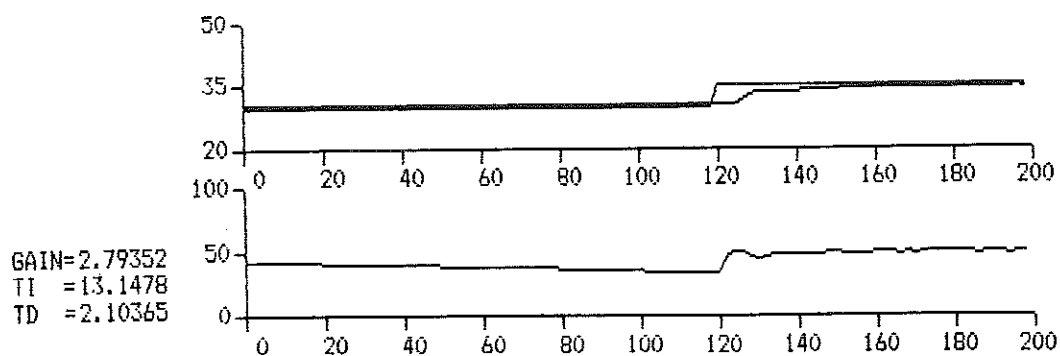
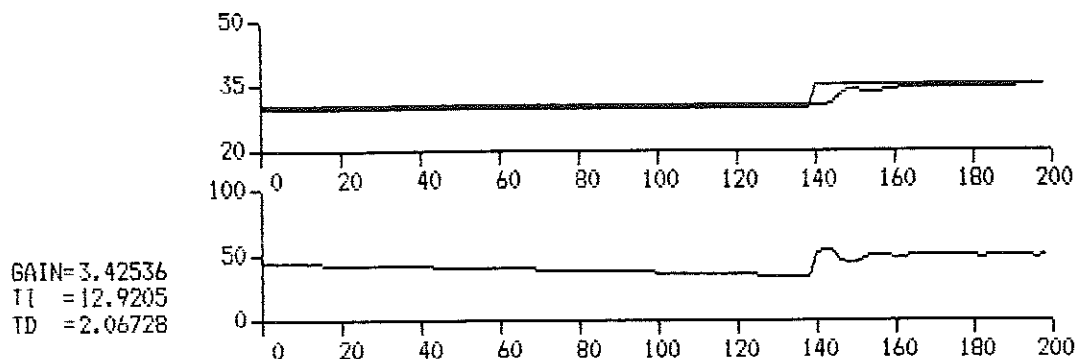


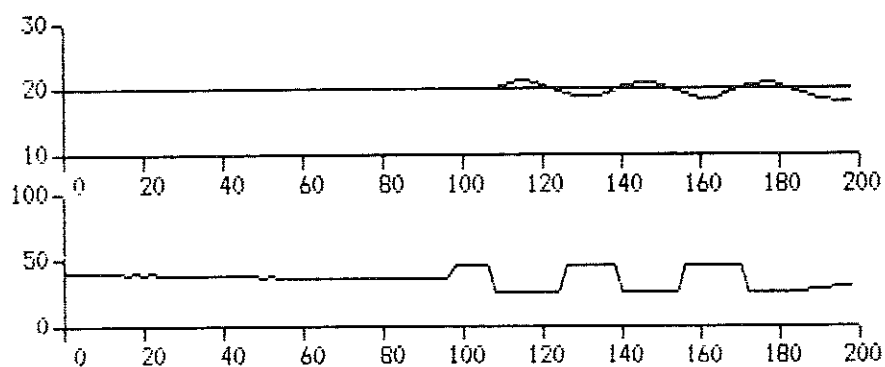
diagram 3c Relämetoden, REG2, stegsvar på lägre driftsnivå efter tuning på denna nivå



Tuning i normalfall.

Vi började med att göra en typisk tuning för var och en av regulatorerna. Ett exempel på en sådan tuning visas i diagram 4.

diagram 4 Normal identifiering, relämetoden



Efter design av regulator parametrar gjordes ett stegsvar för varje regulator, diagram 5,6.

diagram 5 Relämetoden, REG1, stegsvar efter normal identifiering

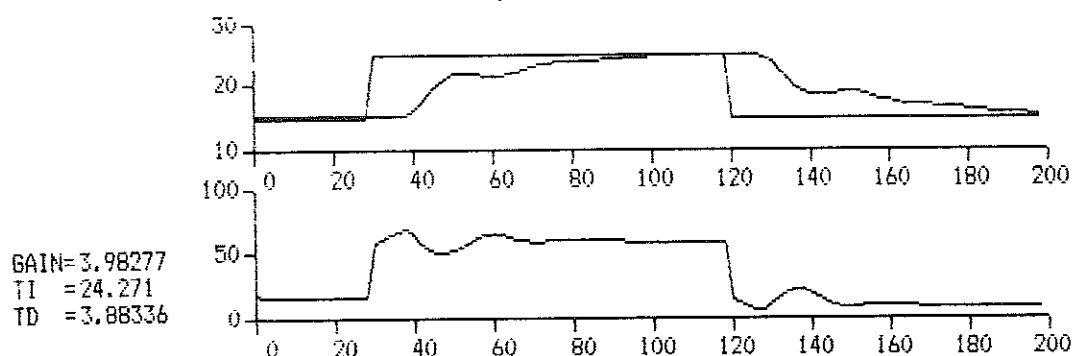
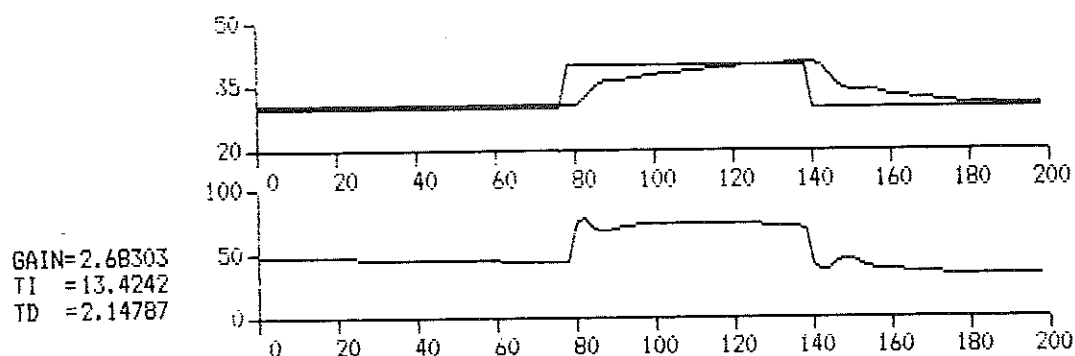


diagram 6 Relämetoden, REG2, stegsvar efter normal identifiering



På försök plockade vi bort derivatadelen utan att i övrigt ändra på P- eller I-delarna, se diagram 7 och 8.

diagram 7 Relämetoden, REG1, stegsvar med bortplockad D-del

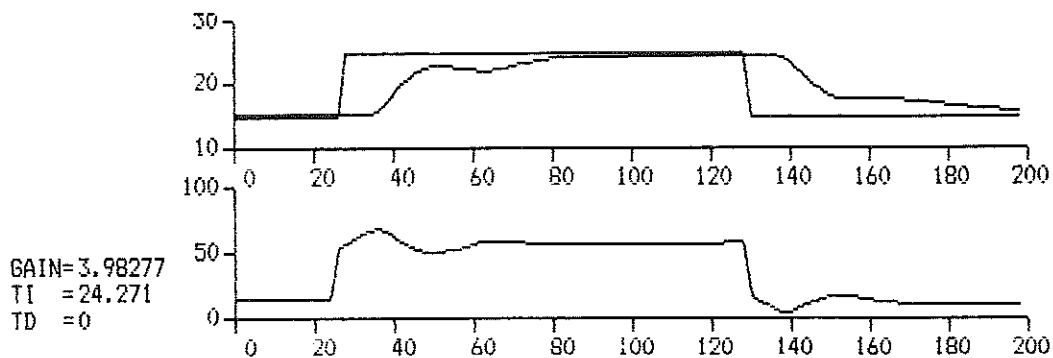
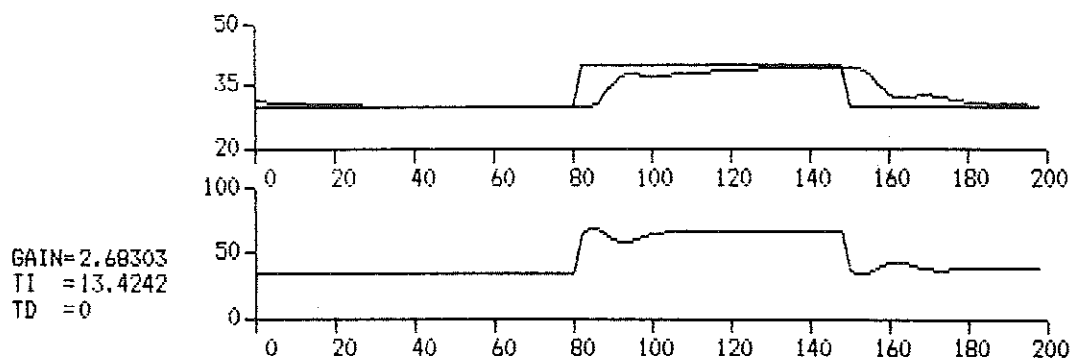


diagram 8 Relämetoden, REG2, stegsvar med bortplockad D-del



Vi ser att stegsvaret både från REG1 och REG2 är relativt långsamma, 60 respektive 45 sek, men de saknar helt översläng. En liten försämring av stegsvaret för REG2 fick vi då derivatadelen plockades bort medan däremot stegsvaret för REG1 förbättrades något.

Om den fullt utvecklade relämetoden, där alternativa designmetoder för olika fall av identifierade processer ingår, istället använts hade vi fått en PI-regulator. Detta hade gett ett bättre resultat.

## Laststörningar

Först hälldes varmt vatten i tanken. Detta medförde att periodtiden blev längre och amplituden större än normalt vilket medförde en längre integraltid samt en mindre förstärkning. Vi fick därmed ett betydligt långsammare stegsvar, diagram 9a,b.

diagram 9a Relämetoden, REG2, identifiering under laststörning

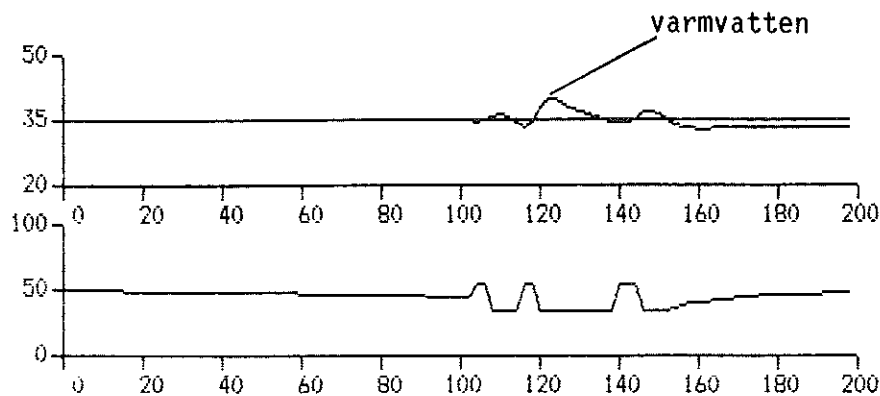
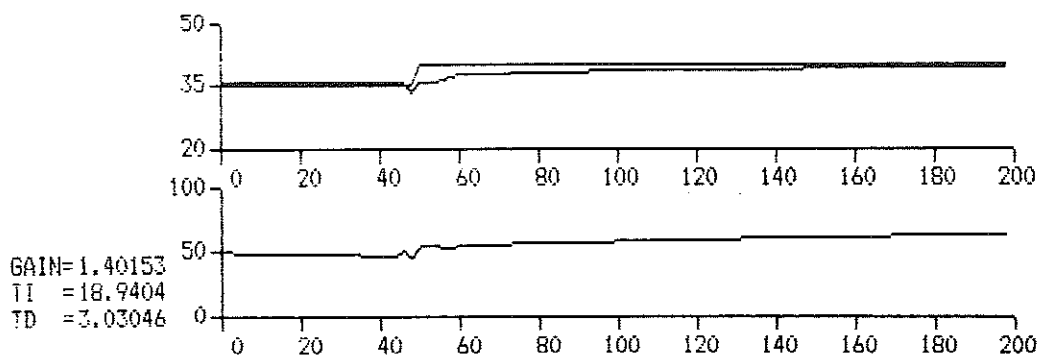
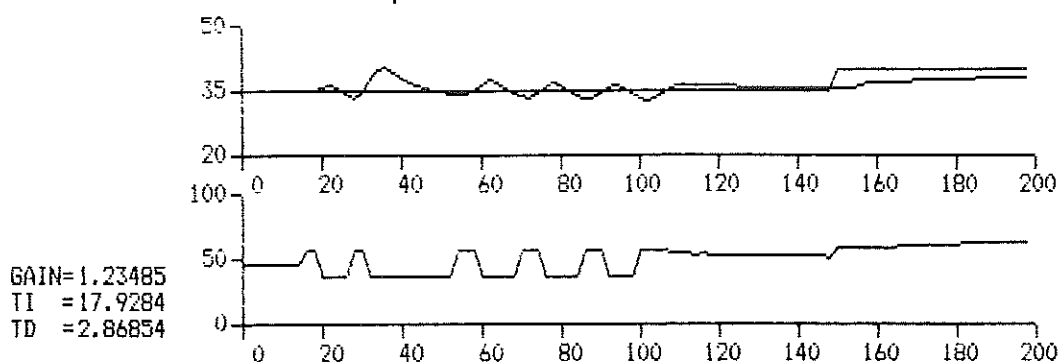


diagram 9b Relämetoden, REG2, stegsvar efter störd tuning



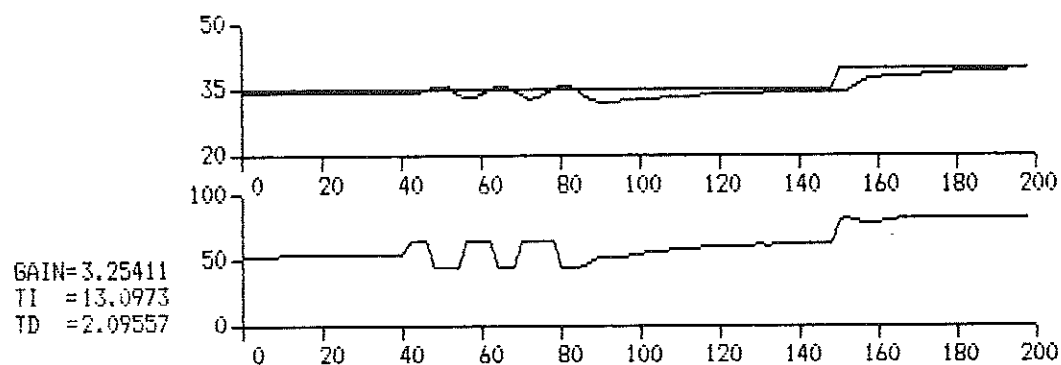
I ett försök att förbättra resultatet gjordes samma störning under en identifiering över tio halvperioder men detta gav ingen märkbar förändring, diagram 10.

diagram 10 Relämetoden, REG2, identifiering under laststörning 10 halvperioder istället för 5



Denna typ av laststörning hade av den fullt utvecklade relämetoden, t.ex. i EKA 40, detekterats och ej påverkat resultatet av tuningen. Som en annan laststörning användes det sjunkande ångtrycket. Problemet här är att tuningen kan helt misslyckas om vi inte når över den övre hysteresgränsen. I detta fall klarar vi precis hysteresgränsen i sista svängningen, diagram 11. Periodtiden blir något längre än normalt vilket resulterar i en längre integraltid. Men trots det är parametrarna skapliga.

diagram 11 Relämetoden, REG2, identifiering och stegsvar då ångtrycket sjunker





## 4.2 Test av stegsvarsmetoden, öppen loop.

### Identifieringen

Störning av processen.

Testsignalen, ett steg med amplituden A, lägges på insignalen till processen. Nödvändig amplitud bestämdes till 15% av maximal styrsignal för REG2-kretsen (jfr fig.10) och till 10% för REG1. Tiden för identifieringen blev 60 sek. för REG2 och 80 sek. för REG1.

Robusthet.

Resultatet av identifieringen, dvs T och L, för REG1 och REG2 vid tre tester med samma förutsättningar redovisas i tabell 4 resp. 5 nedan.

tabell 4 Tre identiska test, stegmetoden öppen-loop, långsam loop

REG1		test1	test2	test3
A=15	T sek	4.9	5.1	5.1
	L sek	8.2	9.1	9.0

tabell 5 Tre identiska test, stegmetoden öppen-loop, snabb loop

REG2		test1	test2	test3
A=10	T sek	2.8	1.8	1.1
	L sek	4.7	5.2	6.7
A=15	T sek	2.5	2.4	2.0
	L sek	5.1	5.1	5.7

Vi ansåg att A=10 inte var tillräckligt vid fallet REG2 och valde därför A=15 för båda fallen vilket ger robust tuning.

Driftfallsberoende.

Vi utförde tuning vid 35 grader för REG2 och 20 grader för REG1 vilket motsvarar nivåer mitt i respektive loops arbetsområde. Därefter jämförde vi stegsvar på högre och lägre nivåer med stegsvar där PI-parametrarna designats vid aktuell nivå. Inga signifikanta skillnader i parametrarna uppträdde och därmed blev stegsvaren lika bra med "gamla" och nya parametrar.

Tuningresultat i normalfall.

Efter en "typisk" identifiering, se diagram 12, ger öppen-loop tunern för REG2 ett stegsvar enligt diagram 14. Stegsvaret är snabbt, 20 sek, och har mycket liten översläng. I REG1-loopen ger tunern ett stegsvar med en översläng på runt 20% och inställningstiden hamnar på 100 sek. Stegsvaret i detta fall redovisas i diagram 13.

diagram 12. Identifiering stegmetoden öppen-loop, normal fall

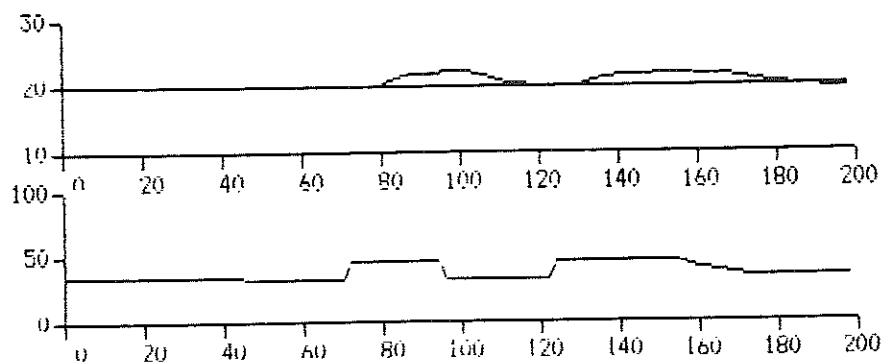


diagram 13. REG1, stegmetoden öppen-loop, stegsvar efter normal tuning

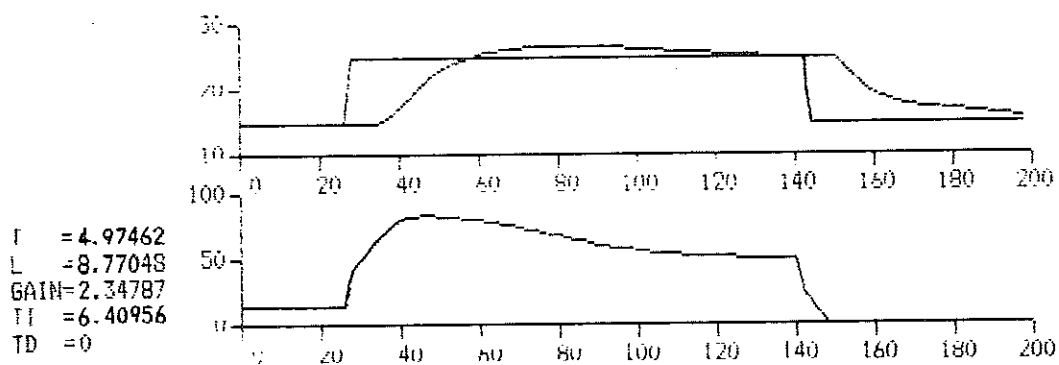
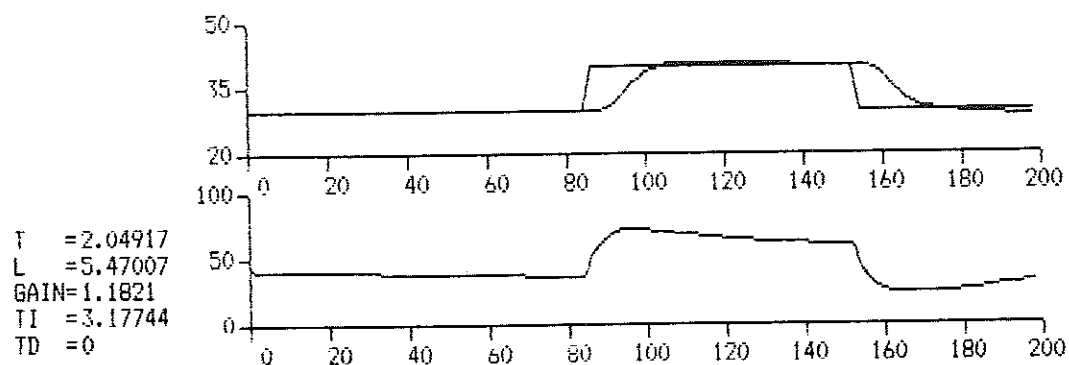


diagram 14. REG2, stegmetoden öppen-loop, stegsvar efter normal tuning



### Laststörningar.

Vi testade först att under identifieringen hålla varmt vatten i tanken. Detta gav som resultat att tunern identifierade en process med mindre  $T$  jämfört med den ostörda processen.

Designen blir därmed försiktigare och i diagram 15 redovisas försöket för REG1, i diagram 16 för REG2. Omedelbart efter identifieringen har vi lagt ett steg med de störda parametrarna.

diagram 15. REG1, stegmetoden öppen-loop tuning vid laststörning och därefter ett stegsvar

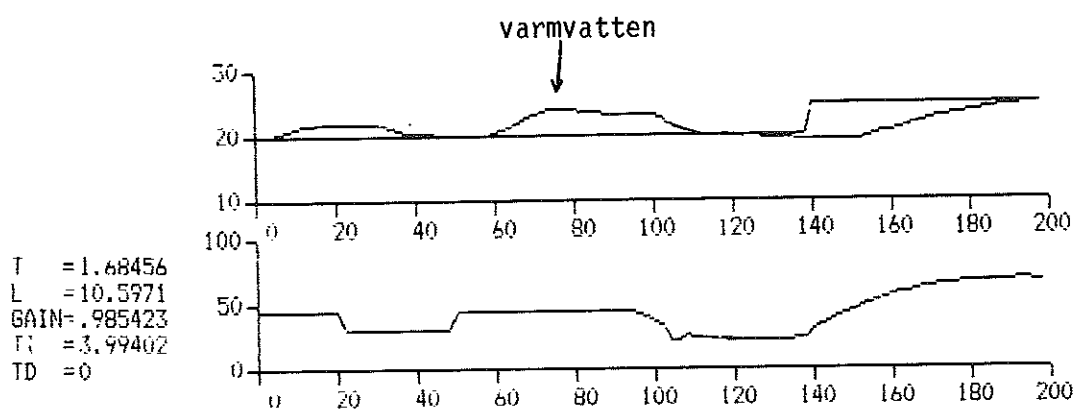
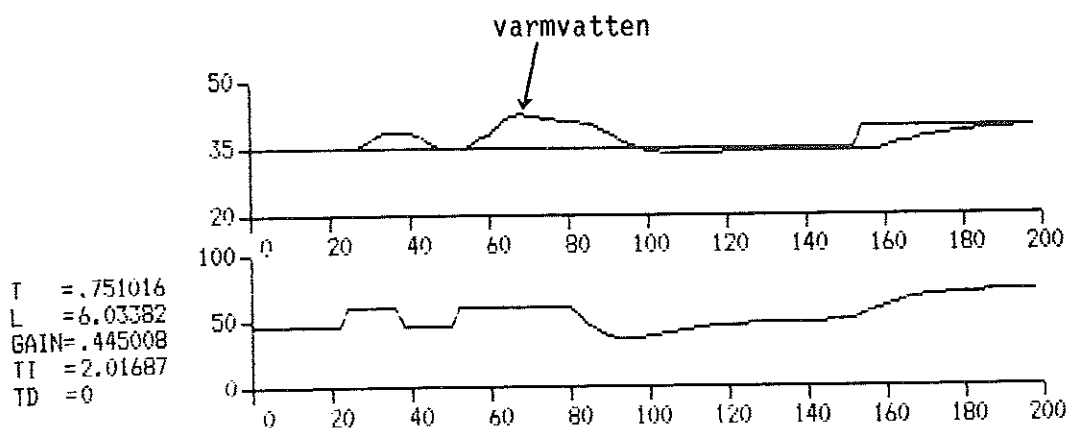


diagram 16. REG2, stegmetoden öppen-loop tuning vid laststörning och därefter ett stegsvar



Efter detta hällde vi istället kallt vatten i tanken under identifieringen. Resultatet blev som man kan vänta sig det motsatta jämfört med föregående störning. Tunern identifierar en långsammare process och styringreppen blir för kraftiga med denna design. Identifiering och ett steg redovisas för REG1 och REG2 i diagram 17 resp. 18 nedan.

diagram 17. REG1, stegmetoden öppen-loop tuning vid laststörning och därefter ett stegsvar

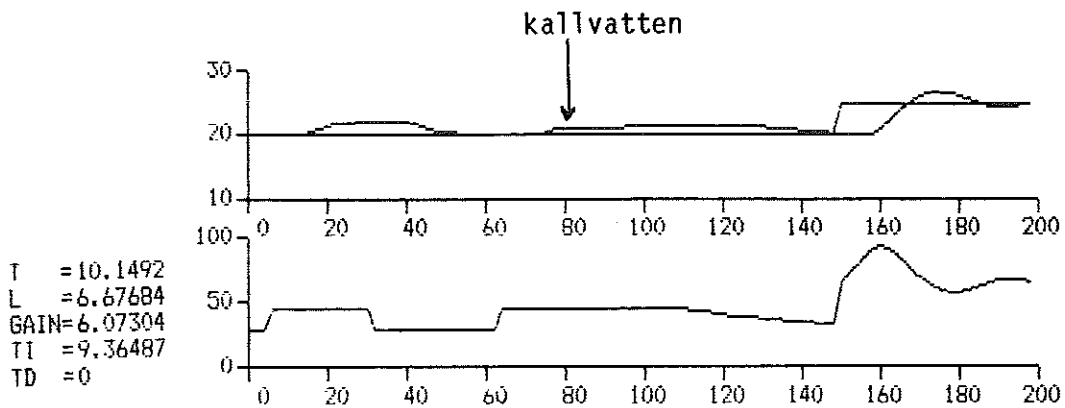
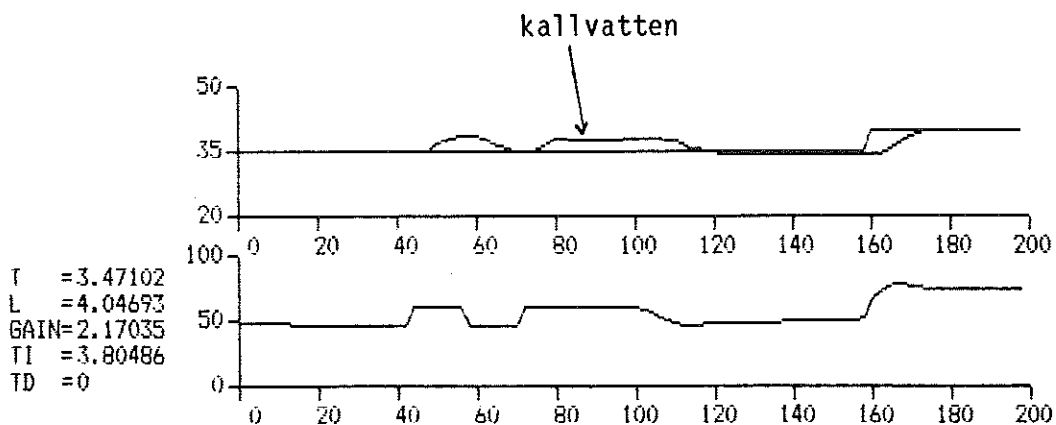
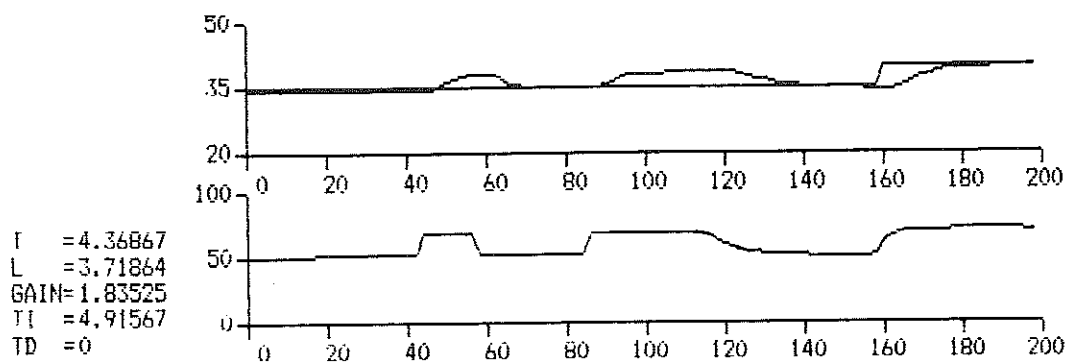


diagram 18. REG2, stegmetoden öppen-loop tuning vid laststörning därefter ett stegsvar



Till sist identifierade vi processen när ångtrycket sjunker som mest. REG2-loopen är i detta läge långsammare än när ångtrycket är i det stabila läge vi använt för våra minimalt störda mätningar och tunern identifierar mycket riktigt en långsammare process. Identifiering och stegsvar återges i diagram 19. I den långsammare REG1-loopen uppträdde inga signifikanta skillnader mot det stabila fallet.

diagram 19. REG 2, stegmetoden öppen-loop tuning under sjunkande ångtryck, därefter ett stegsvar



### 4.3 Test av stegvarsmetoden, slutna loop.

#### Identifiering

Störning av processen.

Steg A läggs i detta fall på börvärdet till regulatorn. Vi kom fram till att A=5 grader behövdes för att kunna identifiera processerna. Tiden för störningen blir för REG2 20 sek. och för REG1 80 sek., men dessa tider är beroende av hur bra regulatorn redan är inställd då steget ligger på tills mätsignalen stabilt uppnått börvärdet. I vårt fall använde vi parametrar som bestämts ur öppen-loop identifieringen.

Robusthet.

Tre tester med samma utgångsvärden, från öppen-loop identifiering, gjordes för båda looparna. Resultaten redovisas för REG1 i tabell 6 och för REG2 i tabell 7.

tabell 6. Tre identiska test för den långsamma loopen

REG1	test 1	test 2	test 3
T sek	22.2	22.8	24.2
L sek	6.1	5.3	7.4

tabell 7. Tre identiska test för den snabba loopen

REG2	test 1	test 2	test 3
T sek	6.0	4.3	5.6
L sek	3.0	3.9	3.3

Eftersom slutna-loop identifieringen beror av regulatorns parametrar gjorde vi även ett konvergenstest där vi utförde upprepade körningar med tunern vilket gav de resultat som redovisas i tabell 8 och 9.

tabell 8. Upprepad tuning med stegmetoden slutna-loop på den långsamma loopen

REG1	öppen-loop	tuning 1	tuning 2	tuning 3
T sek	9.0	22.8	17.0	17.1
L sek	4.4	5.3	6.7	7.0

tabell 9. Upprepad tuning med stegmetoden sluten-loop på den snabba loopen

REG2	öppen-loop	tuning 1	tuning 2	tuning 3	tuning 4
T sek	2.5	5.6	6.5	7.7	7.8
L sek	5.3	3.3	3.1	2.8	2.8

De värden som metoden konvergerar mot ger också den bästa regleringen.

Observera att T skiljer sig kraftigt från öppen-loop identifieringen. En förklaring till detta kan vara att processens andra och större tidskonstant inverkar på identifieringen i sluten loop men inte i öppen loop.

Driftfallsberoende.

De olika driftsfallen fungerar med parametrar från mittnivån och en ny tuning ger ingen markant ändring.

### Tuningresultat i normalfall

Identifieringen visas för REG1 i diagram 20 och för REG2 i diagram 21.

Stegsvaret för REG1 är snabbt, 30 sek, och försumbar översläng noteras. I diagram 22 visas stegsvaret där felet mellan  $t=80$  och  $120$  beror på att ångpannans tryck ändras.

Även för REG2 är stegsvaret snabbt, 14 sek, och överslängen minimal. Se diagram 23.

diagram 20 REG 1, stegmetoden sluten-loop identifiering av den långsamma loopen

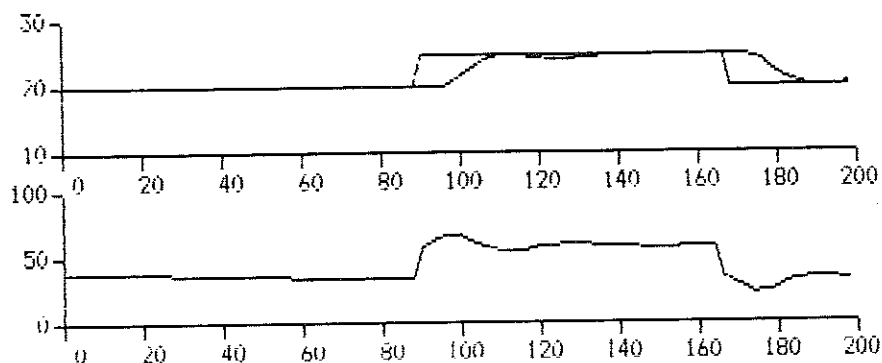


diagram 21. REG 2, stegmetoden sluten-loop identifiering av den snabba loopen

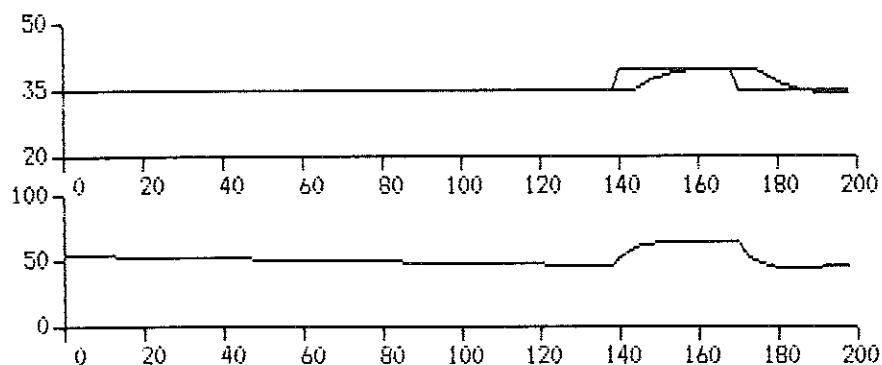
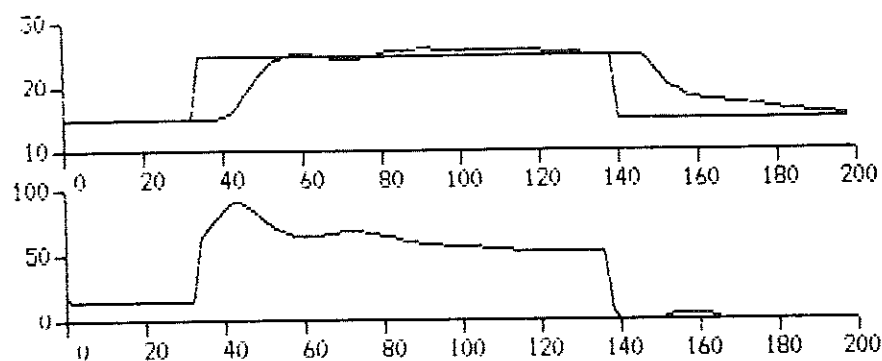


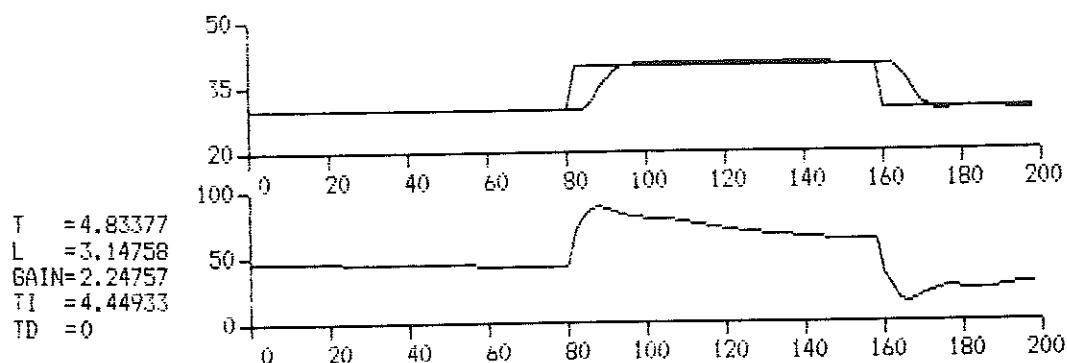
diagram 22. REG 1, stegsvar efter tuning med stegmetoden sluten-loop för den långsamma loopen



T = 15.1791  
L = 5.82813  
GAIN = 4.49554  
TI = 12.774  
TD = 0



diagram 23. REG 2, stegsvar efter tuning med stegmetoden sluten-loop på den långsamma loopen



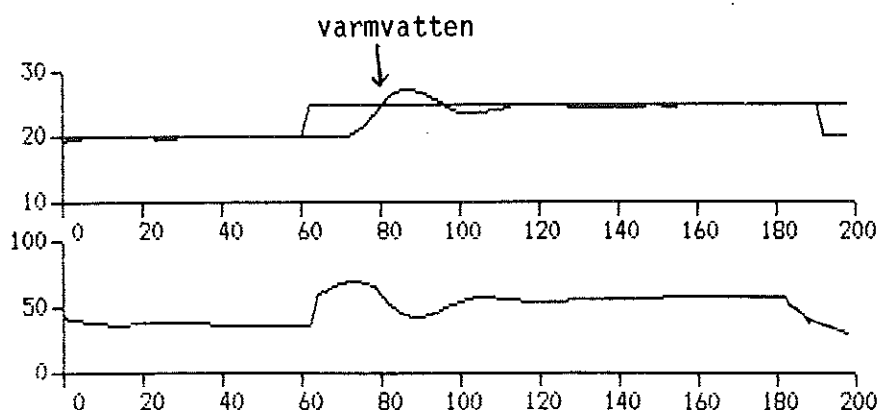
#### Laststörningar.

När varmt vatten hålls i tanken, se diagram 24 vilket gäller REG1, blir ingen design alls möjlig. Samma sak inträffar i REG2-loopen. Vi höllde även i kallvatten, vilket är en i förhållande till varmvattenstörningen liten störning då temperaturdifferansen till cirkulationsvattnet är mindre. Detta påverkade inte identifieringen på något markant sätt.

Vid tuning då panntrycket sjunker misslyckas identifieringen och design blir omöjlig att utföra.

Störningarna, som visar sig främst i styrsignalsintegralen, gör att antingen en lösning saknas till ekvationerna (19) och (20) ur vilka L löses eller att det L som beräknas ger negativa T.

diagram 24. REG1, stegmetoden sluten-loop misslyckad identifiering vid laststörning



## 4.4 Foxboro-metoden

### Identifiering

Som beskrivits tidigare ställer Foxboro-regulatorn om sina parametrar så fort en tillräckligt stor störning detekteras. Därför skiljer sig våra tester av denna tuner något från de övriga.

Robusthet.

Här måste noteras att regulatorns begynnelseparametrar inte varit de samma inför de steg vi givit tunern att designa efter. Följande resultat erhöles:

tabell 10

REG1	test 1	test 2	test 3
P	1.39	5.88	4.76
I	2.40	10.8	13.8
D	0.00	2.40	2.40

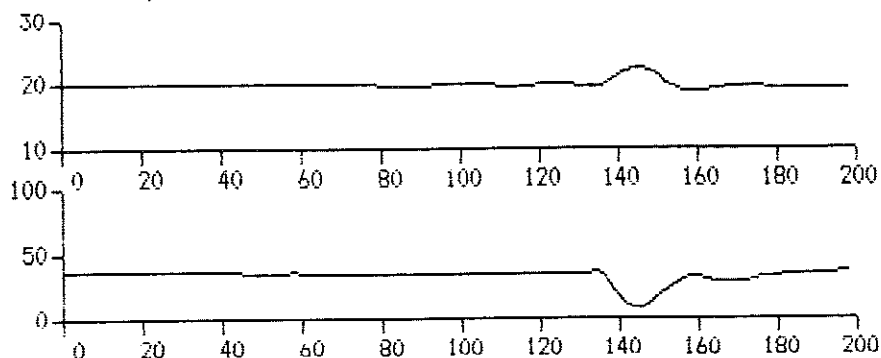
tabell 11

REG2	test 1	test 2	test 3
P	4.76	4.00	3.60
I	4.80	6.00	9.00
D	1.20	1.20	1.20

Laststörningar.

Vi hällde i en spann varmt vatten i tanken och störde därmed processen vilket gjorde att regulatorn fick möjlighet att identifiera processen och designa nya parametrar. Störningen visas i diagram 25 nedan.

diagram 25. REG 1, identifiering på laststörning i långsamma loopen

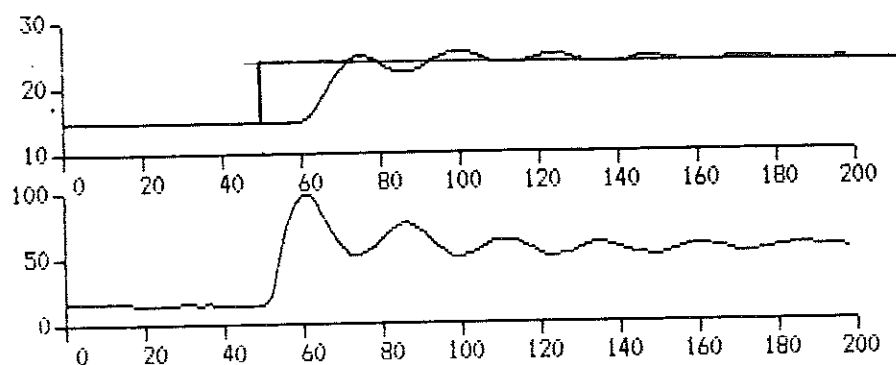


$K=4.0$     $T_i=14.4$     $T_d=3.0$

## Tuningresultat i normalfall

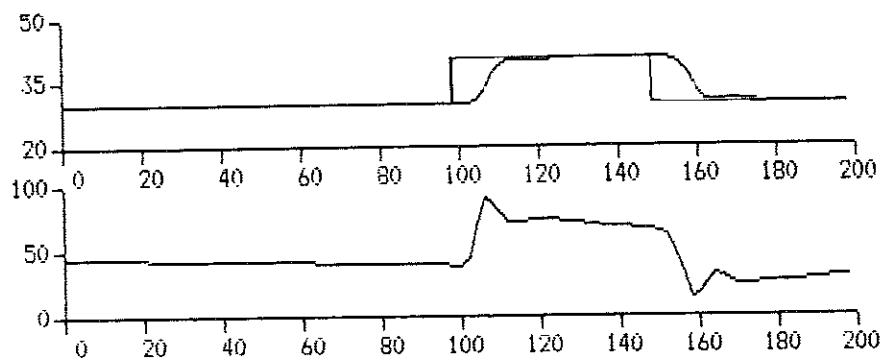
Först gav vi ett antal börvärdesändringar så att regulatorn fick möjlighet att ställa in sig. Därefter undersöktes stegsvaren för båda looparna. Resultaten redovisas i diagram 26 och 27. Vi ser att stegsvaret för REG2 är mycket snabbt, 12 sek, och utan översläng medan däremot REG1 får ett oscillerande stegsvar med ungefär 15% översläng.

diagram 26. REG 1, stegsvar med Foxbororegulatorn, långsamma loopen



$$K = 6.7 \quad T_i = 10.2 \quad T_d = 2.4$$

diagram 27. REG 2, stegsvar med Foxbororegulatorn, snabba loopen

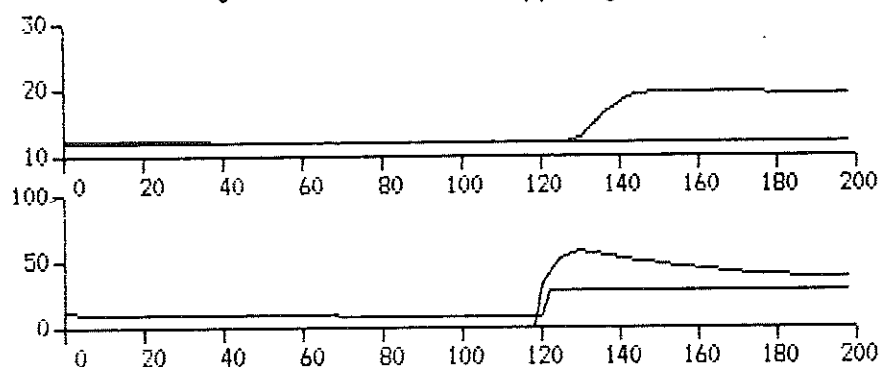


$$K = 4.2 \quad T_i = 6.0 \quad T_d = 1.2$$

### 4.5 Kaskadreglering

I diagram 28 nedan redovisas processens stegsvar vid kaskadkoppling dvs. en börvärdesändring har givits på REG2 och utsignalen från processen, TT1 i figur 10, har registrerats. Som vi här ser uppträder inte den andra större tidskonstanten som nämnts tidigare eftersom uppvärmningseffekten i cirkulationsslingan regleras bort av REG2.

diagram 28 Processdynamik vid kaskadkoppling

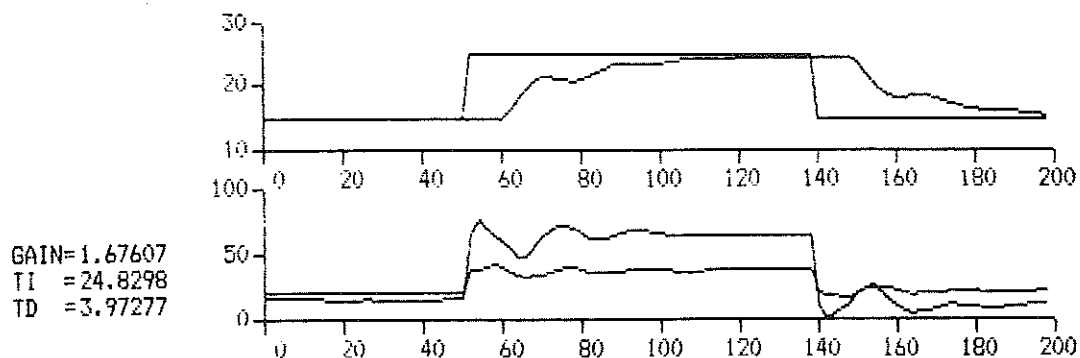


Med relämetoden och stegvarsmetoden gjordes nu en identifiering av detta system. Som regulatorparametrar i REG2 användes de som givits för denna loop av respektive tuner.

#### Relämetoden

Stegsvaret efter en tuing redovisas i diagram 29. Ingen märkbar skillnad jämfört med stegvaret som erhöles vid tuning utan kaskadreglering, jfr. diagram 5, erhöles.

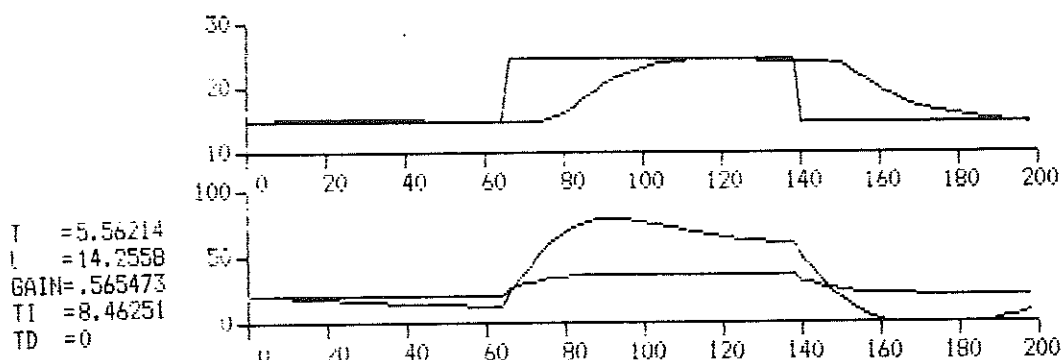
diagram 29 Kaskad, relämetod



### Stegsvarsmetoden öppen-loop

Diagram 30 nedan visar att en markant förbättring uppnåtts jämfört med stegsvaret efter identifiering utan kaskadreglering, jämför diagram 13.

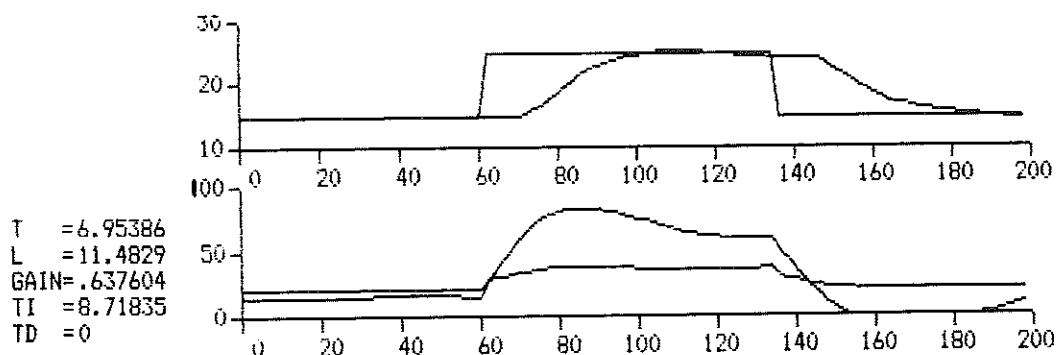
diagram 30 Kaskad, stegsvarsmetoden öppen-loop



### Stegsvarsmetoden sluten-loop

Det visar sig här, diagram 31, att skillnaden mellan öppen och sluten-loop design blir mycket liten, vilket ju inte var fallet vid identifiering utan kaskadreglering. Anledningen till detta kommenteras i Sammanställning av testresultat, kap.5.

diagram 31 Kaskad, stegsvarsmetoden sluten-loop



## 5. Sammanställning av testresultat.

### Störning av processen.

tabell 12 Sammanställning av hur mycket de olika metoderna stör processen.

Processtörning	Amplitud (topp-topp) °C		tid sek	
	REG1	REG2	REG1	REG2
Relämetoden	3	4	80	35
Steg, öppen-loop	3	4	80	60
Steg, sluten-loop	5	5	80	20
Foxboro	-	-	-	-

I detta avseende är Foxboros metod bäst eftersom man använder störningar och börvärdesändringar under drift för att designa PID-parametrarna. Storleken av störningarna som ska ge upphov till parameterändring bestäms av bruset. Trots allt behöver Foxboron initialt, när processen är okänd, ett steg eller någon annan störning för att kunna ställa in sig och därmed måste processen störas på något sätt. Då regulatorn sedan successivt förbättrar sina parametrar vid varje störtillfälle är det svårt att säga hur stor störning man måste ha.

I relämetoden måste man börja med någon reläamplitud, t.ex. 10% av maximal styrsignal. Eftersom man vid fallet okänd process inte känner processförstärkningen kan man inte vara säker på att man kommer över hysteresgränsen som bestämts av bruset. Lyckas inte detta kan man tänka sig att successivt öka reläamplituden tills en nivå som ger de önskade svängningarna uppnåtts och därmed har man fått ett relä med minsta möjliga amplitud.

När det gäller stegmetoden i öppen loop finns i försteget ett krav att processens utsignal skall stiga med minst en viss faktor av bruset. Misslyckas detta kunde man låta steget återgå, öka styrsignalamplituden och lägga på detta större steg tills önskad reaktion från processen uppnås. I sluten-loop kan man tänka sig att stegnivån bestäms av styrsignalsteget från öppen-loopmetoden multiplicerat med den där beräknade processförstärkningen.

Ifråga om den tid processen störs av tuningen konstaterar vi att för stegmetoderna är det svårt att minska tiden eftersom denna bestäms av den tid det tar för processen att stabilisera sig.

I relämetoden kan man inte påverka periodtiden för svängningarna som bestäms av processen men väl antalet svängningar som utförs. Ju fler svängningar desto noggrannare bestämning av periodtid men samtidigt blir metoden med ökat antal svängningar känslig för långsamma processförändringar typ vårt sjunkande ångtryck. Å andra sidan kan man inte minska antalet svängningar hur mycket som helst med tanke på noggrannheten. 4-5 halvperioder tycker vi är lagom.

### Robusthet.

För relämetoden är robustheten inget problem, den ger som vi konstaterat vid testerna samma resultat vid upprepade körningar. Stegmetoden i öppen-loop uppvisar heller inga större bekymmer i detta avseende även om relämetoden nog får betraktas som den bästa av de testade metoderna.

I sluten-loop uppkommer däremot en del problem med robustheten. Metoden är mycket känslig för små variationer i speciellt styrsignalsintegralen och vi bedömer att detta är orsaken till den något tveksamma robustheten.

### Laststörningar.

Vid denna jämförelse har Foxboro regulatorn en särställning då denna använder varje tillräckligt stor störning för att förbättra sina regulatorparametrar. Den intressanta jämförelsen får alltså göras mellan relämetoden, stegmetoden i öppen loop och stegmetoden i sluten loop.

Den första typen av laststörning utgjordes av en spann varmt vatten i tanken. Denna störning orsakade att vi med relämetoden detekterade en för stor amplitud och en för stor periodtid. Designen gav då en mindre förstärkning och en längre integraltid vilket innebar ett långsammare men godtagbart stegsvar.

För stegmetoden i öppen loop gav störningen resultatet att processen identifierades som snabbare och med större processförstärkning än normalt. Detta medförde att både förstärkningen och integraltiden blev mindre. Som resultat gav detta ett långsammare men fullt godtagbart stegsvar. Med stegsvarsmetoden i sluten loop misslyckades identifieringen helt vid denna störning vilket förmodligen beror på den känslighet för störningar i integralen av styrsignalen, SU, som nämnts tidigare.

Den andra typen av laststörning, det sjunkande ångtrycket, orsakade inga nämnvärda problem för relämetoden respektive stegmetoden i öppen loop. Däremot misslyckades även här identifieringen i sluten loop vilket än en gång troligen orsakas av integralen av styrsignalen, SU.

Som en slutsats kan sägas att både relämetoden och stegsvarsmetoden i öppen loop klarar våra laststörningar på ett tillfredställande sätt medan stegsvarsmetoden i sluten loop inte gör detta. Värt att notera är kanske att även relämetoden och stegmetoden i öppen loop kan misslyckas med identifieringen om laststörningen kommer under brusmättningsfasen.

## Design

En jämförande sammanställning av design resultaten redovisas i nedanstående tabeller.

tabell 13. Sammanställning av tuningresultat för långsam loop

REG1	Inställningstid (s)	Översläng (%)
Relämetoden	60	0
Foxboro	85	15
Stegmetod ( öppen )	100	15
Stegmetod ( slutet )	30	0

tabell 14. Sammanställning av tuningresultat för snabb loop

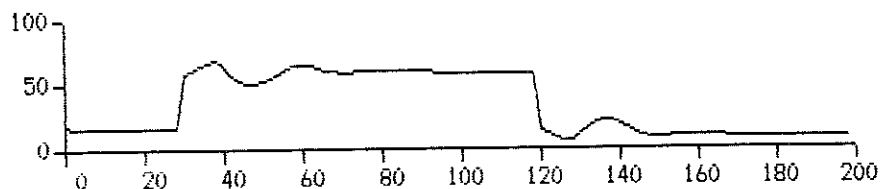
REG2	Inställningstid (s)	Översläng (%)
Relämetoden	45	0
Foxboro	15	0
Stegmetod ( öppen )	20	0
Stegmetod ( slutet )	15	0

tabell 15. Sammanställning av tuningresultat vid kaskadreglering

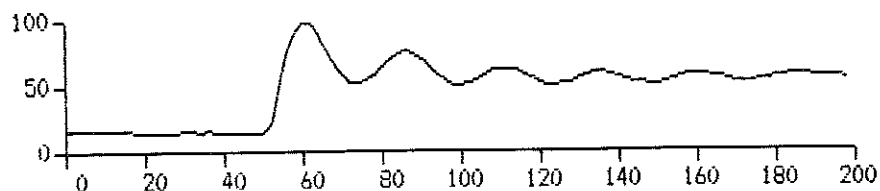
KASKAD	Inställningstid (s)	Översläng (%)
Relämetoden	60	0
Stegmetod ( öppen )	45	0
Stegmetod ( slutet )	45	0

Styr signaler, REG1, efter börvärdessteg:

Relämetoden

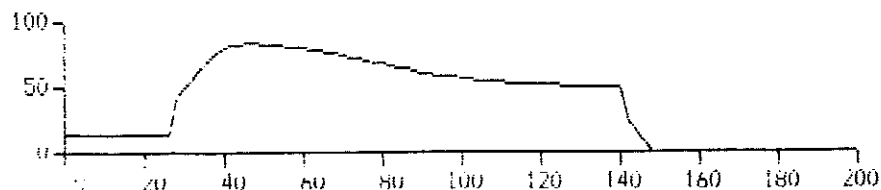


Foxboro

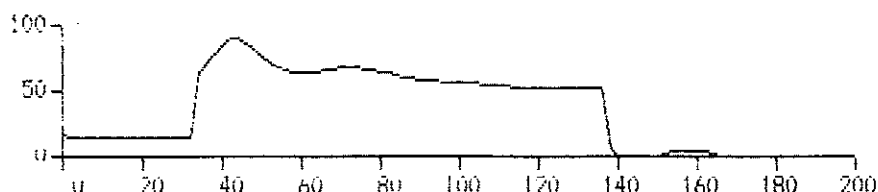




### Stegmetod (öppen)



### Stegmetod (sluten)



Vad det gäller styrsignalerna kan vi generellt säga att stegsvarmetoderna är bäst, relämetoden ibland något svängig och Foxboron vid vissa tillfällen väldigt svängig.

Sett i helhet ger sluten stegsvarmetod bäst reglering när en identifiering väl lyckats.

Vid tuningen av kaskadkopplingen fungerar både sluten och öppen loop utmärkt. De ger i detta fall samma resultat till skillnad från tuningen av REG1 utan kaskad. Detta beror på att utan kaskad har processen som tidigare nämnts två tidskonstanter som vägs samman av identifieringen i sluten loop medan öppen-loopmetoden bara identifierar den snabba tidskonstanten. I kaskad finns endast denna eftersom cirkulationsvattnets uppvärmning regleras bort av den inre loopen och då ger också öppen och sluten loop samma resultat.

Sluten-loopmetoden är med andra ord den mest precisa men har nackdelen att vara störningskänslig.

Relämetoden är den mest robusta men ger något långsamt stegsvar. Om den fullt utvecklade metoden med alternativa designmetoder för olika fall vid identifieringen använts hade resultatet med stor sannolikhet blivit bättre.

### Autotunern ur operatörens synvinkel

Gemensamt för relä- och stegmetoderna är att vid okänd process måste processen bringas till ett stabilt läge, t.ex. genom att styrsignalen lägges konstant på en viss nivå, innan någon tuning kan utföras.

Om stegsvarsmetoden i öppen-loop användes och har ett startvärde på amplituden för styrsignalsteget är det bara att köra igång så fort processen är stabil. För sluten-loop gäller att en körning i öppen-loop måste ha gjorts först om sluten-loop identifiering inte har utförts någon gång på processen. Detta behövs för att ge tidsviktningsvariabeln  $\mu = 4 / (T + L)$  ett värde samt för att ge stegamplituden ett värde på det sätt som tidigare nämnts. Stegamplituden kan naturligtvis även bestämmas manuellt innan en tuning.

Resultatet av identifieringen är dödtid och tidskonstant vilket är parametrar som borde vara bekanta för de flesta som kommer i kontakt med reglering. Detta kan eventuellt vara en liten fördel med metoden.

När det gäller Foxboron behöver man endast bestämma om parametrarna skall räknas om eller inte vid en störning. Är processen helt okänd kan en pretune-fas användas.

## 6. Förslag till vidare arbete

### Process med integrator

Ett problem som förbigåtts i vår stegsvarsmetod är processer som innehåller en integrator. Om detta är fallet kommer försteget i öppen-loop aldrig lägga sig stabilt.

En möjlighet att undersöka detta är att först skicka in en puls och om processen då visar sig innehålla en integrator måste identifieringen ske på ett pulssvar istället för att stegsvar.

### Derivatadel

En annan intressant utvidgning av stegsvarsmetoden skulle vara att införa derivatadel i designen. Vi ser här två alternativ: Man kan antingen göra som i relämetoden, dvs välja  $T_i = k * T_d$  och använda i princip den designmetod vi nu har. Annars måste ytterligare en integral beräknas vid varje identifiering och därefter kan med en ny designmetod PID-parametrarna bestämmas. Nackdelen med ytterligare en integral är att störningskänsligheten blir besvärlig.

### Alternativa designpolynom

De polynom vi nu använder för att designa parametrarna är avsedda att ge stegsvar utan översläng. Polynomen är som tidigare nämnts framtagna ur manuellt inställda och subjektivt optimala parameteruppsättningar för processer med olika värden på  $T / L$ . Att ta fram fler polynom som i förhållande till de befintliga ger snabbare stegsvar med viss översläng respektive försiktigare och därmed långsammare reglering vore enkelt. Detta ger operatören möjlighet att välja hur han vill ha sin reglering. Om man efter en identifiering tycker att stegsvaret är för snabbt eller för långsamt kan man med den alternativa designen enkelt åtgärda detta utan ny identifiering.

Kanske kan man även tänka sig att ta fram polynom speciellt avpassade för processer som är vanligt förekommande i Alfa-Lavals projekt.

## 7. Referenslista

T. W. Kraus and T. J. Myron (1984):

Self-Tuning PID Controller Uses Pattern Recognition Approach.  
Control Engineering, Juni 84.

T. Lindquist (1985):

En autotuner till PID-regulatorer.  
Examnsarbete vid Alfa-Laval i Lund.

Y. Nishikawa, N. Sannomiya, T. Ohta and H. Tanaka (1984):

A Method for Autotuning of PID Control Parameters.  
Automatica vol. 20 no. 3.

K. J. Åström and T. Hägglund (1984):

Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on  
Phase and Amplitude margins.  
Automatica no. 5.

K. J. Åström and B. Wittenmark (1984):

Computer Controlled Systems.

K. J. Åström (1976)

Reglerteori.