

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5423)/1-42/(1990)

# Automatisk regulatorinställning på kontinuerlig pappersmassakokare

Håkan Hedlund

Institutionen for Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
April 1990

## Förord

Under fyra månaders tid har jag haft förmånen att utföra ett intressant och givande examensarbete hos Kamyr AB i Karlstad. Jag vill ta tillfället i akt att tacka mina handledare Claes Lysén, Kamyr AB och Tore Hägglund, Institutionen för reglerteknik vid LTH, vilka ställt upp med tid, tålamod och kunskap, så att jag har kunnat utföra mitt examensarbete.

Dessutom vill jag speciellt tacka drift- och instrumentpersonal på Bäckhammars Bruk och Skoghallsverken, vilka gett mig många goda råd och annan ovärderlig hjälp, vid mina praktiska försök.

Lund april 1990

Håkan Hedlund

## Sammanfattning

Avsikten med detta examensarbete har varit att undersöka om det är möjligt att använda automatisk regulatorinställning (auto-tuning), enligt Hägglund-Åströms relämetod, på en kontinuerlig pappersmassakokare. Härledning av metoden, såväl som praktiska resultat redovisas, både för manuell tuning och med SattControl Instruments ECA 400 och ECA 40 regulatorer. Studien visar att det är möjligt att utföra automatisk regulatorinställning, med vissa modifieringar vad gäller val av hysteres och designberäkningar.

<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> <b>MASTER THESIS</b>	
		<i>Date of issue</i> April 1990	
		<i>Document Number</i> CODEN: LUTFD2/(TFRT-5423)/1-42/(1990)	
<i>Author(s)</i> Håkan Hedlund		<i>Supervisor</i> Tore Hägglund, Claes Lysén	
		<i>Sponsoring organisation</i> Kamyr AB	
<i>Title and subtitle</i> Automatisk regulatorinställning på kontinuerlig pappersmassakokare (Automatic controller tuning on a continuous pulp digester)			
<i>Abstract</i> <p>The purpose of this master thesis has been to investigate if it is possible to use auto-tuning with the relay method on a continuous pulp digester. Derivation of the method as well as practical results are shown both for manual tuning and for the SattControl Instruments ECA400 and ECA40 controllers. The report shows that it is possible to perform auto-tuning on a continuous pulp digester, with some modifications of the design calculations.</p>			
<i>Key words</i> Auto-tuning, continuous pulp digester			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i>			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 42	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

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.

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Pappersmassatillverkning</b> .....	<b>2</b>
2.1. Olika tillverkningsmetoder .....	2
2.2. Kontinuerlig sulfatkokning .....	2
<b>3. Reglerkretsar på Kamyrykokare</b> .....	<b>5</b>
3.1. Flisnivå .....	6
3.2. Lutnivå .....	7
3.3. Ångfastemperatur .....	8
<b>4. Inställning av regulatorparametrar</b> .....	<b>9</b>
4.1. Tuning med relämetod enligt Hägglund-Åström .....	9
4.1.1. Identifiering av process .....	10
4.1.2. Regulatordesign .....	11
4.2. Autotuning med ECA400 och ECA40 .....	16
4.3. Tuning för hand .....	17
<b>5. Fältförsök</b> .....	<b>18</b>
5.1. Skoghallsverken .....	18
5.1.1. Flisnivå .....	18
5.2. Bäckhammars bruk .....	25
5.2.1. Flisnivå .....	26
5.2.2. Lutnivå .....	31
5.2.3. Ångfastemperatur .....	33
<b>6. Slutsatser och kommentarer</b> .....	<b>35</b>
6.1. Anpassning av ECA 400 till massakokerier .....	35
6.2. Tuning för hand .....	36
6.3. Val av designspecifikationer .....	37
6.4. Förslag till framtida arbete .....	38
<b>7. Referenser</b> .....	<b>39</b>

# 1. Inledning

KAMYR AB är världens ledande tillverkare av kontinuerliga pappersmassakokerier.

Vid leverans av nya anläggningar såväl som vid ombyggnader åtgår mycket tid och arbetskraft till att justera regulatorparametrar, för att få bra funktion hos anläggningen. Önskvärt är att i någon mån automatisera förfarandet. Då hoppas man dels spara tid, men även vara säker på att optimala regulatorparametrar erhållits. Dessutom bör parametrarna enkelt och snabbt kunna ändras då processen ändras, vid slitage, ombyggnader och kvalitetsomställning.

SATT CONTROL INSTRUMENTS tillverkar självinställande regulatorer med auto-tuning, ECA 400 och ECA 40. De har applicerats på några "svåra" reglerkretsar på Bäckhammars Bruks kontinuerliga sulfatmassakokare. Normalt sitter här Foxboro luftregulatorer tillsammans med överordnat KAMYR styrsystem.

Vidare har tuningsförfarandet provats för hand på Skoghallsverkens kontinuerliga sulfatmassakokare, vilken är utrustad med Honeywells DDC-system TDC 2000 och överordnat MODO-Chemetics styrsystem.

Målet för examensarbetet har varit att prova, om det går att använda automatisk regulatorinställning enligt Hägglund-Åströms relämetod (auto-tuning) på en kontinuerlig massakokare. Dessutom har förslag till modifieringar på ECA 400, för anpassning till de speciella krav som ställs på reglerfunktionen vid en massakokare, tagits fram. Avsikten har ej varit att hitta optimala regulatorparametrar.



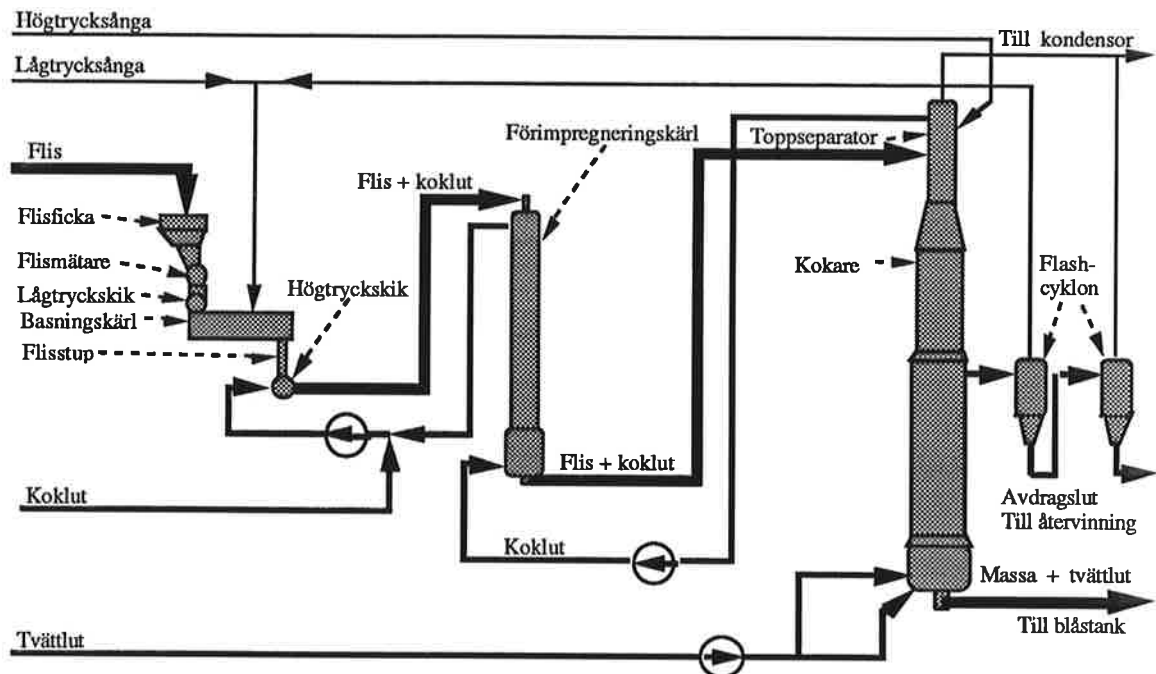


Fig 2. Kontinuerlig Kamyrcokare med förimpregneringskärlet

Flis matas ned i flisfickan, där viss uppvärmning sker med ånga. Därefter matas flis, via flismätare och lågtryckskik, till basningskärlet. Där värms flisen ytterligare med ånga av 100–130 kPa tryck. Härvid ersätts luften i flisbitarna med vattenånga, för att underlätta senare impregnering med kokvätskan.

Från basningskärlet ramlar sedan flisen ned i flisstupet. Här matas flisen in i kokeriets högtrycksdel via högtryckskiken och hamnar i förimpregneringskärlet, fortsättningsvis kallat för "fimpen". Här impregneras flisen med vitlut av ca 120°C temperatur och under 1–1.2 MPa tryck. Uppehållstiden under vilken flisbitarna, från toppen när botten, är ca 30 minuter. I botten av fimpen finns en bottenskrapa, vilken roterar med ca 4 rpm, med vars hjälp fimpen töms. Flisen pumpas sedan tillsammans med koklut över till toppseparatorn i kokartoppen. Härvid höjs även temperaturen till 130–145°C.

Toppseparatorn skiljer av en del av kokluten vilken cirkulerar tillbaka till fimpen, resten faller tillsammans med flisen ner i kokaren. Kokaren är en stor behållare av 50–90 meters höjd och dess diameter kan uppgå till 8 meter. Det finns två huvudtyper av kokare ång-vätskefaskokare och hydrauliska kokare. De två som undersökts är båda av den första typen. I ångfasen hålles en temperatur av 168–170°C, temperaturen styrs med varierande ånginflöde. Flisbitarna ramlar ned överst på flispelaren. Flisnivån ligger någon meter över lutnivån. Flispelaren sjunker sakta nedåt, samtidigt som uppvärmd koklut av en temp av ca 170°C strömmar genom hålrummen i flispelaren. Härvid löses ligninet ut och fibrerna friläggs. Uppehållstiden i kokzonen är 2–3 timmar. Kokluten dras av vid avdragsilarna, genom ändring av detta avdragsflöde styrs lutnivån i kokaren. De urkokta flisbitarna når nu undre delen av kokaren där tvättzonen är belägen. Här tvättas nu massafibrena med tvättlut, vilken tillförs i kokarbotten med en temperatur av ca 85°C och strömmar i motström och dras av genom avdragsilarna. Uppehållstiden i tvättzonen är 3–4 timmar. Temperatursänkningen är viktig, enär massans styrka ökar avsevärt.

I botten på kokaren sitter en roterande skrapa, vilken hjälper till att mata ut massafibrena ur kokaren. Även kokarens övertryck hjälper till att blåsa ut pappersmassan ur kokaren genom blåsledningen till blåstank eller tvättdiffusör.

Fiberkoncentrationen är här ca 10%. Genom att ändra flödet genom blåsledningen styrs flisnivån i kokaren.

Pappersmassans grad av nedkokning mätes enligt Kappatal. Viktigt för jämn kvalitet är god styrning av alla nivåer, flöden och temperaturer i hela kokarsystemet.

Sedan pappersmassan ytterligare tvättats och även silats kan den användas till papperstillverkning, det blir då ett brunfärgat papper vilket går bra att använda till kraftpapper och kartong. Önskas vitt papper måste massan blekas.



### 3. Reglerkretsar på Kamykokare

Reglersystemet på en Kamykokare kompliceras av att de olika reglerkretsarna verkar i samma behållare, se fig 3.

Två nivåer, flisnivån och vätskenivån styrs med var sin reglerkrets. Vätskenivån, fortsättningsvis kallad lutnivån, styrs med varierande avdragsflöde, genom silar, så att endast vätska dras av. Flisnivån däremot styrs med blåsflödet ur botten av kokaren, men endast 10% av flödet är fibrer, resten vätska bestående av tvättlut. Detta stör naturligtvis vätskeregleringen, men denna störning kan i viss mån kompenseras genom att tvättlutsinflödet i kokarbotten kvotstyres till blåsflödet, spädfaktorstyrning. Här kanske någon form av framkoppling och/eller korskoppling mellan nivåkretsarna, skulle förbättra reglerfunktionen.

Temperaturregleringen störs ej nämvärt av nivåändringar då den kretsen har mycket mindre tidskonstant. Däremot störs nivåerna väldigt mycket av ändringar i ångflödet, ty trycket i kokaren ändras. På vissa kokare finns även tryckreglering med luftinblåsning i kokartoppen.

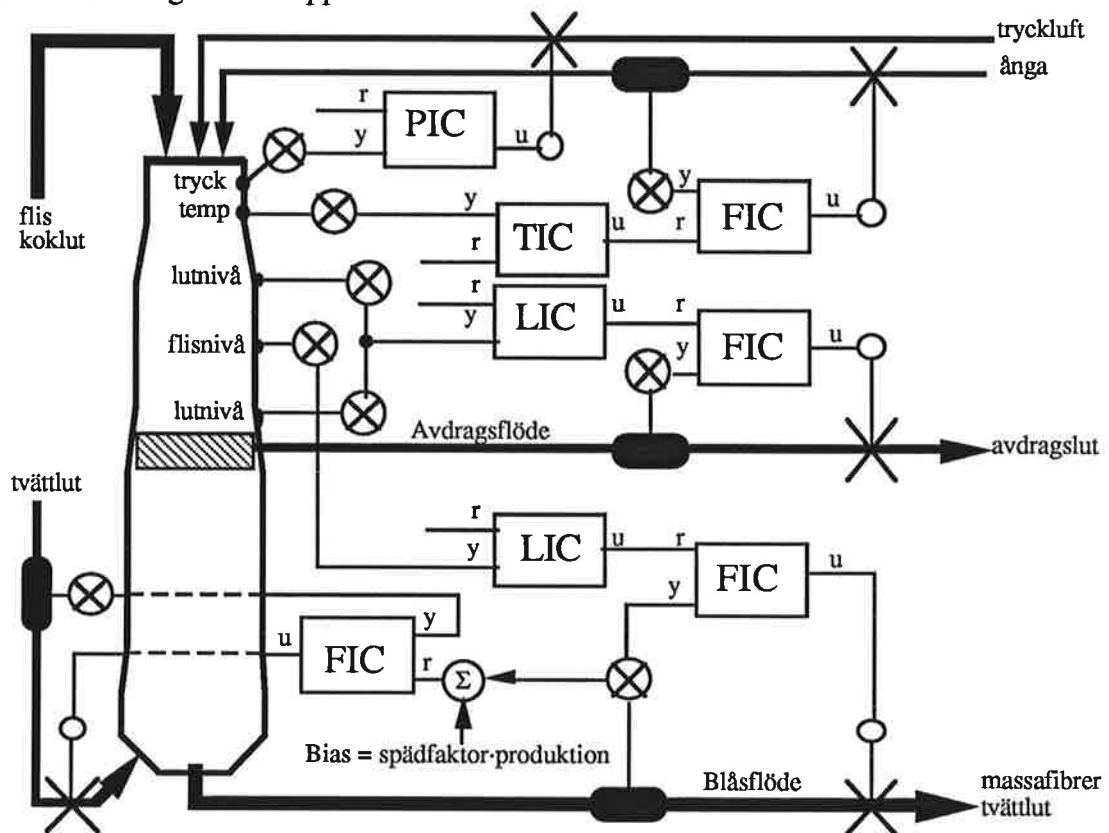


Fig 3. De viktigaste reglerkretsarna på en Kamykokare.

### 3.1. Flisnivå

Flisen kommer tillsammans med koklut in i toppen på kokaren. Där ramlar flisbitarna ner och lägger sig överst på flispelaren, vilken sakta rör sig nedåt genom att färdig massa blåses ur botten på kokaren via blåsledningen. För att få konstant uppehållstid för flisen och därmed jämn kvalitet på den färdiga pappersmassan, fordras att flispelarens höjd hålls konstant eller med andra ord att flisnivån hålls konstant. Det medför också att flispelaren rör sig med konstant hastighet ner genom kokaren. Viktigt är också, att flisen är av jämn kvalitet vad gäller storlek och torrhalt.

För att styra detta finns en blåsflödesreglering kaskadkopplad med flisnivåregleringen, se fig 4. Flisnivån mätes med radioaktiv och/eller mekanisk mätgivare, vars mätområde 0-100% motsvarar 1-1.5m . Flisnivån ligger ca 5m nedanför kokarens topp. Mätområdet 0-100% är då ca 44-45.5m, vilket är ca 3% av totalnivån (vid 50m kokarhöjd).

Blåsflödet mäts av en magnetisk flödesmätare.

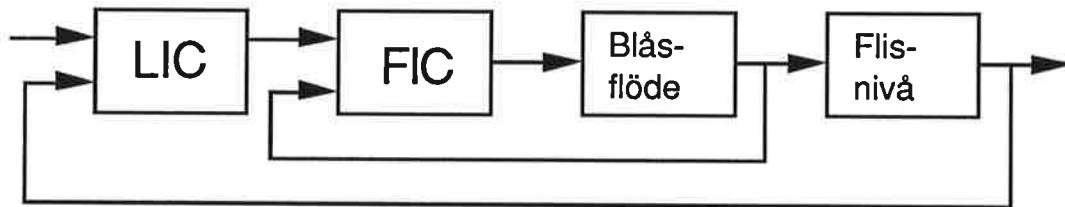


Fig 4. Principschema flisnivåreglering.

Det är av yttersta vikt att ändringarna av blåsflödet är små, eftersom stora ändringar får återverkningar på de andra reglerkretsarna i kokaren, vilka i sin tur kan ändra flisnivån. Vidare vill man ha konstanta uppehållstider i kokarens olika zoner, allt för att få bra och jämn kvalitet på pappersmassan. De efterföljande processerna, exempelvis tvätt-difusör, kräver jämt tillflöde för bra funktion. Därför ställs regulatören in för lugn och långsam reglering, dessutom ställs snäva max- och mingränser på blåsflödet, ca +/- 5% kring medelflödet.

Flisnivåstyrningen har mycket stora störningsproblem. Störningar beror på ojämn inmatning av flis i kokartoppen, ändringar i tryck beroende på ångflödet, ändringar av avdragsflöde och tvättflöde. Dessutom kan koncentrationen massa i blåsflödet ändra sig, detta kan justeras med ändring av bottenkrapans varvtal. Det är viktigt att det är jämn packningsgrad i flispelaren, liksom att flispelaren rör sig nedåt med jämn hastighet, och inte tvekar eller fastnar vid silplåtar och dylikt.

Dessutom är flisen ingen vätska, utan det kan bildas hålrum i flispelaren, vilka senare kan rasa ihop. Då ändras naturligtvis flisnivån.

Ibland finns tendenser till att relätningen sätter hela eller delar av flispelaren i lågfrekvent svängning, även detta syns på flisnivån.

Ytterligare störkälla kan vara skumbildning i ångfasen, vilket tolkas av strålningsmätaren som flis. Då är det bra att även ha mekaniskt mätsystem som reserv.

### 3.2. Lutnivå

Lutnivån upprätthålls av en balans mellan inkommande och utströmmande vätskeflöden. Reglering åstadkommes med kaskadkopplad reglering av avdragsflödet, se fig 5. Lutnivån mätes med differenstrycksgivare, vars mätområde 0-100% motsvarar 10m. Lutnivån ligger 2-3m under flisnivån. Mätområdet 0-100% är då ca 33-43m, vilket är ca 20% av totala lutnivån (vid 50m kokarhöjd).

Avdragsflödet mätes med magnetisk flödesmätare.

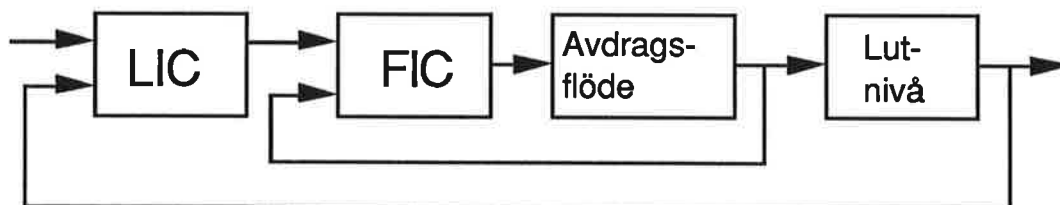


Fig 5. Principschema lutnivåreglering.

Även här bör regleringen vara lugn med små ändringar i avdragsflödet, detta för att ej påverka flisnivån, men även undvika problem i efterföljande processer. Lutnivån störs av ändringar i kokarens övriga till- och frånflöden, dessutom har tryckändringar, beroende på ångflödet, betydelse. Ändring av utflöde av vätska genom blåsledningen kan kompenseras med ändring av tvättlutstillförsel. I de fall där tryckreglering med luft finnes, kan tryckvariationer, uppkomna av ändrat ångflöde, till viss del kompenseras.

### 3.3. Ångfastemperatur

I kokarens ångfas värms den flis och lut som överförs från "fimpen", från ca 140°C till 168-170°C. Till detta åtgår ånga och temperaturen styrs med hjälp av en kaskadkopplad ångflödesreglering, se fig 6. Temperaturgivaren är oftast av resistiv typ medan flödet mäts med differensstryck över strypfläns.

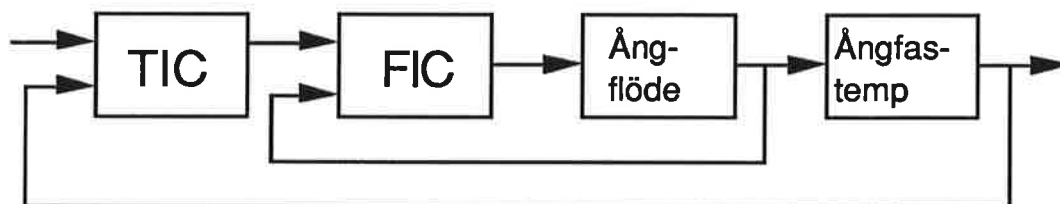


Fig 6. Principschema ångfastemperaturreglering.

Denna reglerkrets kräver snabb reglering och litet fel, eftersom massakvalitén är mycket känslig för temperaturvariationer. Denna krets tål också stora och snabba ändringar av av ångflödet.

## 4. Inställning av regulatorparametrar

I processindustrin är PID-regulatorn den absolut vanligaste. Med en riktig inställning av proportional-, integral- och derivataparametrar klarar denna regulator att styra de flesta reglerkretsar på ett utmärkt sätt. Tyvärr är det ganska vanligt att PID-parametrarna ej är valda optimalt, då detta kräver mycket god processkännedom och dessutom kan det ta lång tid att prova sig fram. Vidare borde parametrarna snabbt och enkelt kunna ändras då processen ändras, till exempel vid produktionsändringar, slitage, ombyggnader och dylikt.

För att underlätta regulatorparametrarnas inställning finns på marknaden självinställande regulatorer av olika adaptiva och auto-tuning typer.

I denna rapport har Satt Controls ECA 400 och ECA 40 studerats närmare. De använder auto-tuner med relämetod enligt Hägglund-Åström. ECA 400 kan även köras adaptiv, men detta har tiden ej medgett att prova.

### 4.1. Tuning med relämetod enligt Hägglund-Åström

Hägglund-Åströms metod kan ses som en utveckling av Ziegler-Nichols frekvensdomän metod, för inställning av PID-parametrar. Med Ziegler-Nichols metod sätts processen i okontrollerad svängning genom att proportionaldelen ökas i återkopplingen, då kan kritisk förstärkning och egenfrekvens detekteras. Hägglund-Åströms metod däremot använder en återkoppling med ett relä under tuningfasen, varmed processen fås i kontrollerad svängning, även här fås kritisk förstärkning och frekvens, se fig 7. Vidare skiljer sig beräkningsmetoderna åt väsentligt. Nedan redovisas Hägglund-Åströms metod.

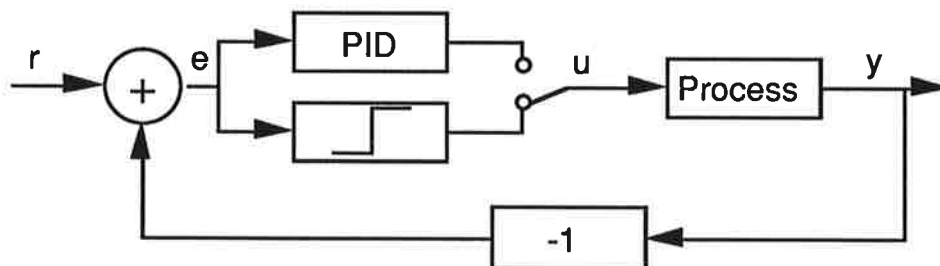


Fig 7. Tuning relämetod.

#### 4.1.1. Identifiering av process

För att identifiera processen görs en "tuning", PID-regulatorn kopplas ur och ett relä med amplituden  $d$  kopplas in istället. Om vid tuningens början, ärvärdet skiljer sig från börvärdet, ändras börvärdet så att det under tuningen har det värde som ärvärdet hade vid tuningens start.

Med hjälp av uppmätta amplituder och periodtid på processsignal och styrsignal, hittas den punkt på processens Nyquistkurva, där den negativa inversen av reläets beskrivande funktion skärs.

Första termen i reläets Fouriertransform är  $4 \cdot d / \pi$ . Processens amplitud mätes upp till  $(a)$ . Kritiska förstärkningen kan då beräknas enligt.

$$K_c = \frac{1}{\text{abs}(G(i \cdot \omega_c))} = \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot a} \quad (1)$$

Tiden mellan två hysteresgenomgångar av felet, eller reläomslag, uppmätes som den kritiska perioden  $t_c$ . För att få metoden mindre känslig för brus och andra störningar lägges ett hysteresband ( $\epsilon$ ) runt nollgenomgången, se fig 8 och 9.

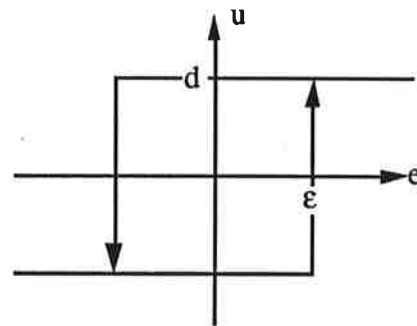


Fig 8. Hystereskaraktistik.

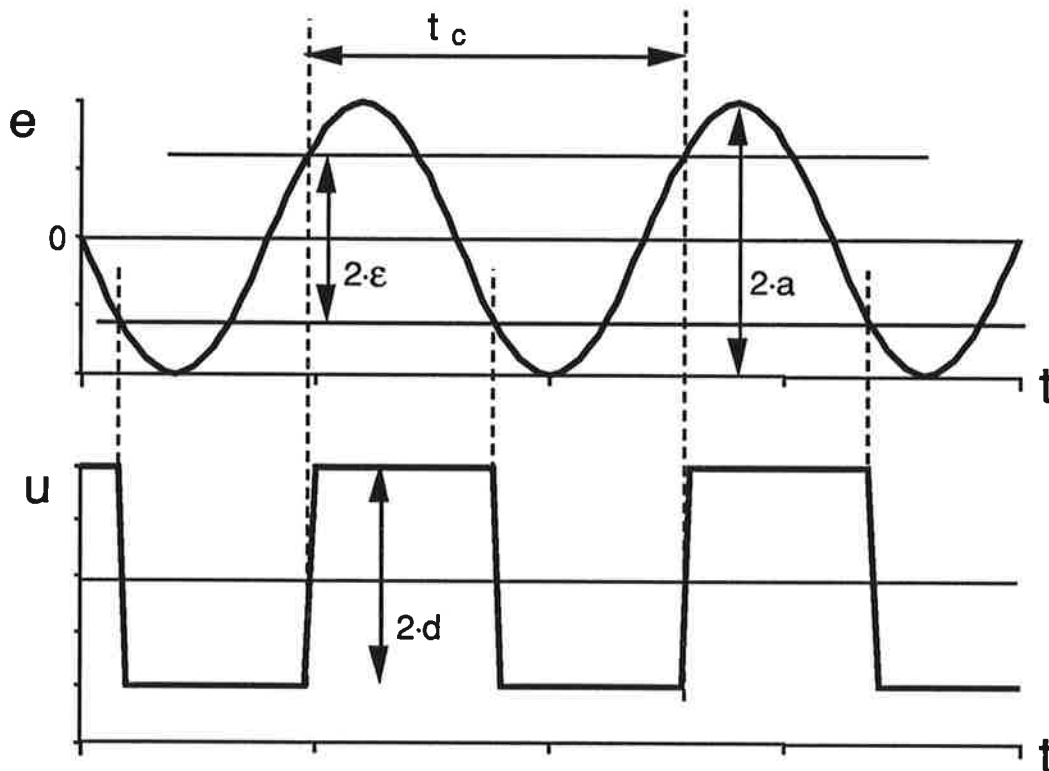


Fig 9. Exempel på kurvor vid tuning enligt relämetod.

### 4.1.2. Regulatordesign

Designmetoden går ut på att man med hjälp av en PID-, PI- eller PD-regulator kan flytta det öppna systemets identifierade punkt på Nyquistkurvan, i olika riktningar i Nyquistdiagrammet, se fig 10.

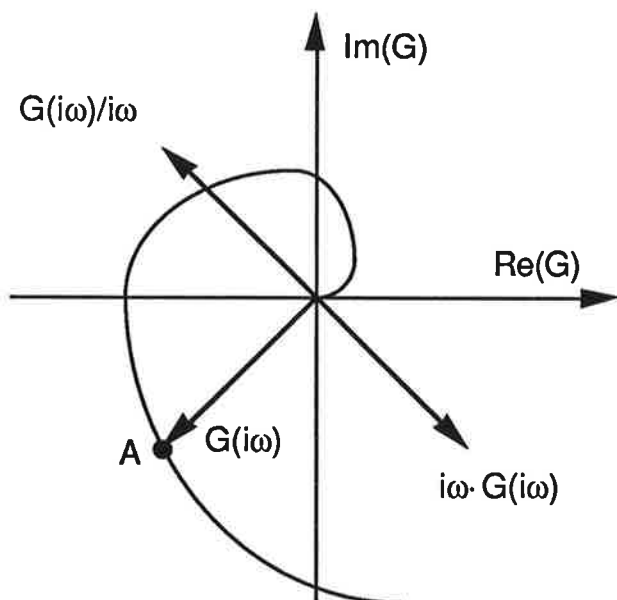


Fig 10. Förflyttningar i G-planet.

Det betyder att den identifierade punkten (A) kan flyttas i G-planet i de olika riktningarna  $G(i\omega)$ ,  $G(i\omega)/i\omega$  och  $i\omega \cdot G(i\omega)$  genom att ändra på P-, I- respektive D-del i regulatorn.

Det återkopplade systemets uppförande påverkas genom olika val av amplitudmarginal ( $A_m$ ), fasmarginal ( $\varphi_m$ ) och kvoten mellan integral- och derivatadel ( $\alpha$ ). Viss betydelse har även val av hysteres ( $\epsilon$ ) och reläamplitud ( $d$ ).

Observera att begreppen kritisk förstärkning ( $K_c$ ), amplitudmarginal ( $A_m$ ) och fasmarginal ( $\varphi_m$ ) har en något annorlunda definition än vad som är brukligt, se fig 11.

En process har överföringsfunktionen  $G(s)$ , dess Nyquistkurva ritas upp. Reläets beskrivande funktion är.

$$N(a) = \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot a} \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon}{a}\right)^2} - i \cdot \frac{\epsilon}{a} \right] \quad (2)$$

Dess negativa invers

$$-\frac{1}{N(a)} = -\frac{\pi}{4 \cdot d} \sqrt{a^2 - \epsilon^2} - i \frac{\pi \cdot \epsilon}{4 \cdot d} \quad (3)$$

ritas upp, se fig 11.

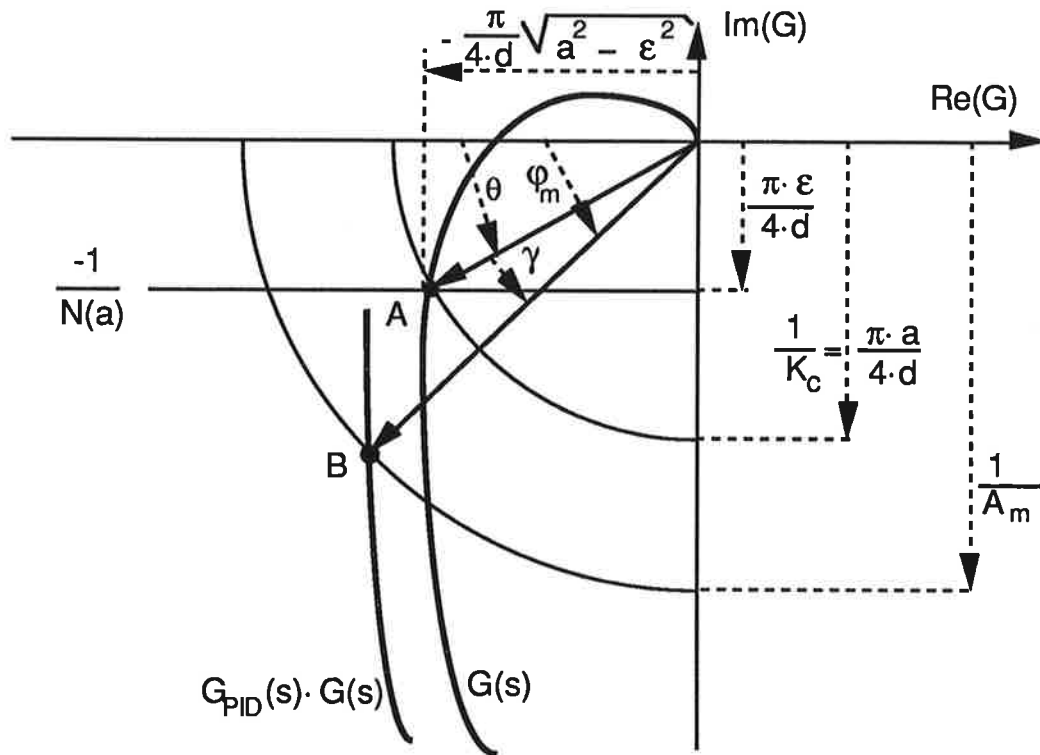


Fig 11.

Punkten A har följande läge i G-planet.

$$A(x, iy) = \left( -\frac{\pi \sqrt{a^2 - \epsilon^2}}{4 \cdot d}, -i \frac{\pi \cdot \epsilon}{4 \cdot d} \right) \quad (4)$$

dessutom ligger punkten på radien

$$\frac{1}{K_c} = \text{abs}( A(x, iy) ) = \frac{\pi \cdot a}{4 \cdot d}$$

Nu önskar vi flytta punkten A till punkten B med hjälp av en PID-regulator, så att punkten hamnar på en cirkel med radien 1/amplitudmarginalen ( $1/A_m$ ) och ligger längs linjen för önskad fasmarginal ( $\phi_m$ ). Genom denna skärningspunkt, vid B, går därför Nyquistkurvan för  $G_{PID}(s) \cdot G(s)$ .

PID-regulatorn antas vara på parallellform och dess Laplace-transform är

$$G_{PID}(s) = P_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot I_p} + s \cdot D_p \right) \quad (5)$$

vidare har vi en process  $G(s)$ . Genom relätningen vet vi att  $\omega_c$  för  $G(s)$  ligger vid punkten A, på cirkeln  $1/K_c$ . Det kompenserade systemets överföringsfunktion blir

$$P_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot I_p} + s \cdot D_p \right) \cdot G(s) \quad (6)$$

Dess argument vid  $\omega_c$  blir då

$$\arg \left( 1 + \frac{1}{i \cdot \omega_c \cdot I_p} + i \cdot \omega_c \cdot D_p \right) - \pi + \theta \quad (7)$$

där



$$\theta = \arcsin(\epsilon/a) \quad (8)$$

För att få önskad fasmarginal ( $\varphi_m$ ), krävs argumentet ( $\varphi_m - 180^\circ$ ). Då gäller

$$\arctan\left(\omega_c \cdot D_p - \frac{1}{\omega_c \cdot I_p}\right) + \theta - 180^\circ = \varphi_m - 180^\circ \quad (9)$$

vilket efter förenkling blir

$$\omega_c \cdot D_p - \frac{1}{\omega_c \cdot I_p} = \tan(\varphi_m - \theta) = \tan(\gamma) \quad (10)$$

Den vinkel ( $\gamma$ ) som regulatorn ska vrida systemet i G-planet för att få önskad fasmarginal ( $\varphi_m$ ) blir således

$$\gamma = \varphi_m - \theta \quad (11)$$

Den förstärkning som regulatorn måste ha för att ge systemet önskad amplitudmarginal  $A_m$  får vi ur sambandet

$$\text{abs}(G_{\text{PID}}(i \cdot \omega_c)) \cdot \text{abs}(G(i \cdot \omega_c)) = \frac{1}{A_m} \quad (12)$$

där

$$\text{abs}(G_{\text{PID}}(i \cdot \omega_c)) = P_p \cdot \text{abs}\left(1 + \frac{1}{i \cdot \omega_c \cdot I_p} + i \cdot \omega_c \cdot D_p\right) \quad (13)$$

insättning av 10 ger

$$\text{abs}(G_{\text{PID}}(i \cdot \omega_c)) = P_p \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\gamma)} = \frac{P_p}{\cos(\gamma)} \quad (14)$$

Vidare ger 1 att

$$\text{abs}(G(i \cdot \omega_c)) = \frac{1}{K_c} = \frac{\pi \cdot a}{4 \cdot d} \quad (15)$$

insättning i 12 ger då

$$\frac{P_p}{K_c \cdot \cos(\gamma)} = \frac{1}{A_m}$$

där  $P_p$  löses ut som

$$P_p = \frac{K_c \cdot \cos(\gamma)}{A_m} \quad (16)$$

Insättning av 1, 8 och 11 ger då

$$P_p = \frac{4 \cdot d \cdot \cos\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\epsilon}{a}\right)\right)}{A_m \cdot \pi \cdot a} \quad (17)$$

Dessutom måste ett förhållande mellan I- och Ddel väljas enligt

$$\alpha_p = \frac{I_p}{D_p} \quad (18)$$

Insättning i 10 ger då

$$\omega_c D_p - \frac{1}{\omega_c \cdot \alpha_p \cdot D_p} = \tan(\gamma) \quad (19)$$

Lösning av andragradsekvationen m a p  $D_p$  blir

$$D_p = \frac{\tan(\gamma) + \sqrt{\tan^2(\gamma) + 4/\alpha_p}}{2 \cdot \omega_c} \quad (20)$$

Insättning av

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{t_c} \quad (21)$$

ger

$$D_p = \frac{t_c \cdot \left( \tan(\gamma) + \sqrt{\tan^2(\gamma) + 4/\alpha_p} \right)}{4 \cdot \pi} \quad (22)$$

eller med insättning av 8 och 11

$$D_p = \frac{t_c}{4 \cdot \pi} \left[ \tan\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\epsilon}{a}\right)\right) + \sqrt{\tan^2\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\epsilon}{a}\right)\right) + \frac{4}{\alpha_p}} \right] \quad (23)$$

ekv 18 ger sedan

$$I_p = \alpha_p \cdot D_p \quad (24)$$

Ofta är regulatorerna implementerade på serieform istället

$$P_s \left( 1 + \frac{1}{s \cdot I_s} \right) (1 + s \cdot D_s) \quad (25)$$

Följande omvandlingsformer gäller

Serie  $\rightarrow$  Parallell

$$P_p = P_s \cdot \frac{I_s + D_s}{I_s} \quad (26)$$

$$I_p = I_s + D_s \quad (27)$$

$$D_p = \frac{I_s \cdot D_s}{I_s + D_s} \quad (28)$$

$$\alpha_p = \frac{I_p}{D_p} = \frac{(1 + \alpha_s)^2}{\alpha_s} \quad (29)$$

Parallell  $\rightarrow$  Serie (gäller endast då  $I_p \geq 4 \cdot D_p$ , dvs  $\alpha_p \geq 4$ )

$$P_s = \frac{P_p}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot D_p}{I_p}} \right] \quad (30)$$

$$I_s = \frac{I_p}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot D_p}{I_p}} \right] \quad (31)$$

$$D_s = \frac{I_p}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot D_p}{I_p}} \right] \quad (32)$$

$$\alpha_s = \frac{I_s}{D_s} = \frac{\alpha_p - 2}{2} + \sqrt{\frac{(\alpha_p - 2)^2}{4} - 1} \quad (33)$$

Designformlerna kan även skrivas direkt på serieform

$$P_s = \frac{\alpha_s \cdot K_c \cdot \cos(\gamma)}{(\alpha_s + 1) \cdot A_m} \quad (34)$$

$$D_s = \frac{(\alpha_s + 1) \cdot t_c}{\alpha_s \cdot 4 \cdot \pi} \left[ \tan(\gamma) + \sqrt{\tan^2(\gamma) + \frac{4 \cdot \alpha_s}{(1 + \alpha_s)^2}} \right] \quad (35)$$

$$I_s = \alpha_s \cdot D_s \quad (36)$$

eller med insättning av 1, 8 och 11

$$P_s = \frac{\alpha_s \cdot 4 \cdot d \cdot \cos\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)\right)}{(\alpha_s + 1) \cdot A_m \cdot \pi \cdot a} \quad (37)$$

$$D_s = \frac{(\alpha_s + 1) \cdot t_c}{\alpha_s \cdot 4 \cdot \pi} \left[ \tan\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)\right) + \sqrt{\tan^2\left(\varphi_m - \arcsin\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)\right) + \frac{4 \cdot \alpha_s}{(1 + \alpha_s)^2}} \right] \quad (38)$$

$$I_s = \alpha_s \cdot D_s$$

Några förslag till optimala val av  $A_m$ ,  $\varphi_m$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  och  $d$  är svårt att ge, då det är väldigt olika krav på uppförandet, för olika processer. Viss ledning ges i kapitel 4.2, 4.3 och 5, vad beträffar processer inom pappersmassaindustrin.

Ibland, vid hög störningsnivå och vid vissa nivåregleringar, önskas en PI-regulator.

$$P \cdot \left(1 + \frac{1}{s \cdot I}\right) \quad \text{Lika för både parallell- och serieform.}$$

Liknande formler som de för PID-regulatorn kan härledas, men ger inte lika bra resultat, då det inte längre går att flytta systemet godtyckligt i G-planet. Endast riktningarna  $G(i\omega)/i\omega$  och  $G(i\omega)$  är möjliga. Detta medför att det endast går att försämra fasen på systemet, se fig10.

Istället föreslås design enligt 44 och 45, utökat med val av amplitudmarginal ( $A_m$ ).

$$P = \frac{K_c}{A_m} \quad (39)$$

$$I = 0.6366 \cdot t_c \quad (40)$$

$$D = 0$$

Detta ger I-tid i samma storleksordning som vid PID-design med fasmarginal 45°.

## 4.2. Autotuning med ECA400 och ECA40

Den autotuner som används i Satt Control ECA 400 är baserad på den modifierade Ziegler-Nichols metoden beskriven i kap 4.1. Denna regulator är implemeterad i serieform, där felet påverkar enbart integraldelen medans proportional- och derivatadel påverkas av processvärdet.

Först kontrolleras om processignalen måste filtreras, om så är fallet ställs lämplig filterkonstant in på processignalens ingång. Otillräckligt filtrerad signal kan ge osäkra omslag vid felets nollgenomgångar i tuningfasen.

Antag nu att vi har kopplat in en ECA 400 på någon process.

När processen befinner sig någorlunda i stabil jämvikt kan Auto-tuning aktiveras med tryck på en knapp. Man kan antingen köra regulatorn manuellt eller i auto vid start, efter tuningen går regulatorn alltid över i auto.

Tuningen startas med att lämplig hysteres ( $\epsilon$ ), maximalt 6%, och reläamplitud ( $d$ ) bestäms med ledning av processens brus, reläamplituden maximeras till 3, 5 eller 10% av maximal styrsignal.

När 4-9 halvperioder genomlupits är tuningen avslutad. Då räknas först  $K_C$  och  $\gamma$  ut enligt 1, 8 och 11. Sedan beräknas regulatorparametrarna utgående från 34, 35 och 36, men i ECA 400 har man valt en fast amplitudmarginal ( $A_m=2$ ) och en fast fasmarginal ( $\phi_m=\pi/4=45^\circ$ ), vidare är förhållandet mellan integral- och derivatadelarna fastlagt ( $\alpha_s=I_s/D_s=4$ ). Detta ger följande förenklade designformler.

$$P_s = 0.4 \cdot K_C \cdot \cos(\gamma) \quad (41)$$

$$D_s = 0.3125 \cdot \frac{t_c}{\pi} \cdot \left[ \tan(\gamma) + \sqrt{\tan^2(\gamma) + 0.64} \right] \quad (42)$$

$$I_s = \alpha_s \cdot D_s \quad (43)$$

Vid vissa processer kan det vara önskvärt att använda en PI-regulator istället, vid en del nivåregleringar och då det är mycket störningar. Det känns av vid tuningen. Då väljs följande PI-design.

$$P_s = 0.5 \cdot K_C \quad (44)$$

$$I_s = 0.6366 \cdot t_c \quad (45)$$

$$D_s = 0$$

Detta kan även förväljjas, liksom design vid lång tidsfördröjning i processen enligt.

$$P_s = 0.25 \cdot K_C \quad (46)$$

$$I_s = 0.25 \cdot t_c \quad (47)$$

$$D_s = 0$$

I de flesta fall ger en PID-regulator bäst resultat.

Liknande designberäkning används i den enklare ECA 40 regulatorn.

### 4.3. Tuning för hand

Har man ej tillgång till en ECA 400 eller ECA 40 och processen är långsam, kritisk tidsperiod större än 5—10 min, har man möjlighet att utföra tuningen för hand. Och förfar då enligt följande.

1. Se till att processen är i stabil jämvikt, filtrera vid behov. Vidare måste beslutas om andra reglerkretsar vilka kan påverka resultatet ska ställas i manuell eller auto.
  2. Välj lämplig hysteres ( $\epsilon$ ), så den har större amplitud än processens brus och övriga störningar, lämpligt område 0. 5-10%.
  3. Välj lämpligt styrsignalsutslag ( $d$ ), som simulerar reläfunktionen. 5% är bra att prova med, lämpligt område är annars 3 - 10%.
  4. Sätt regulatorn i manuell, öka styrsignalen med  $d$ .
  5. När processvärdet passerat  $\epsilon$  minskas styrsignalen  $2 \cdot d$ .
  6. När processvärdet sedan passerar den andra hysteresgränsen ( $-\epsilon$ ) ökas styrsignalen med  $2 \cdot d$ . Momenten 5 och 6 upprepas sedan några gånger, tills tydliga kurvor erhållits.
  7. Sätt tillbaka styrsignalen till ursprungligt värde. Sätt över regulatorn i Auto, eller kör manuellt.
  8. Plotta ut kurvor visande processens ärvärde ( $y$ ) och styrsignal ( $u$ ). Välj stora skalor så allt syns tydligt. Leta reda på processamplituden ( $a$ ) svängningstiden ( $t_c$ ) samt styrsignalsamplituden ( $d$ ).
  9. Regulatorparametrar räknas ut enligt formler i kapitel 3. 1. För val av  $A_m$ ,  $\phi_m$  och  $\alpha$  se kap 5. Observera att hänsyn måste tagas till om regulatorn är av serie eller parallellform. Dessutom finns regulatorer skrivna på tillverkarspecifika former, där identifiering med serie- eller parallellform måste göras, för att få likvärdiga parametrar. I sällsynta fall måste kompensering ske, om min och max styrsignal ej motsvarar 4mA till 20mA (0% resp 100%), detta gäller främst vissa överordnade specialsystem. Dessa specifikationer kan hittas i respektive tillverkarmanual, men saknas tyvärr ofta.
  10. Ställ in uträknade regulatorparametrar i regulatorn, och utvärdera resultatet.
- Tuningen bör göras om några gånger, då resultaten förhoppningsvis blir likartade.
- Dessutom bör man före tuning kontrollera om processen är direkt eller reverserande, så styrsignalen ändras åt rätt håll.

## 5. Fältförsök

### 5.1. Skoghallsverken

Skoghallsverken ingår i STORA-koncernen och är beläget på en udde i Vänerm strax söder om Karlstad. Där finns en kontinuerlig sulfatkokare vilken tillverkar ca 1000 ton pappersmassa per dygn. Kokaren är av ång-vätskefastyp med förimpregneringskärl.

Denna kokare är utrustad med Honeywell TDC 2000 DDC-system och ett överordnat MODO-Chemetics styrsystem. Då det i detta fall visade sig svårt att koppla in en ECA 400 regulator beslöts att försöka utföra relätuningen för hand, på befintlig utrustning. Här utfördes endast försök på kokarens flisnivå.

#### 5.1.1. Flisnivå

På Skoghallsverkens sulfatkokare finns flisnivåregulator både i TDC- och MODO-systemen, vilket underlättade försöken avsevärt då det var väldigt enkelt att skifta regulator. Det fanns då möjlighet för driftspersonalen att snabbt skifta tillbaka till ursprunglig regulator, om problem uppstod, på nätter och andra tider då regleransvarig personal ej fanns på plats.

Flisnivåkretsen är sedan kaskadkopplad med blåsflödeskretsen i TDC-systemet. Överraskad blev jag när jag upptäckte att blåsflödesregulatorn bestod av kaskadkopplade I-regulatorer, med  $I_{s1}=1.2s$  resp  $I_{s2}=6s$ . Dessutom är flödet uppdelat i två ledningar. Samtidigt räknades blåsflödet om till blåsproduktion, där endast fiberdelen av flödet ingår. Se fig 12 och jämför med fig 4. Här fanns även möjlighet att kompensera för koncentrationsvariationer, men det var inte inkopplat vid tuningstillfällena.

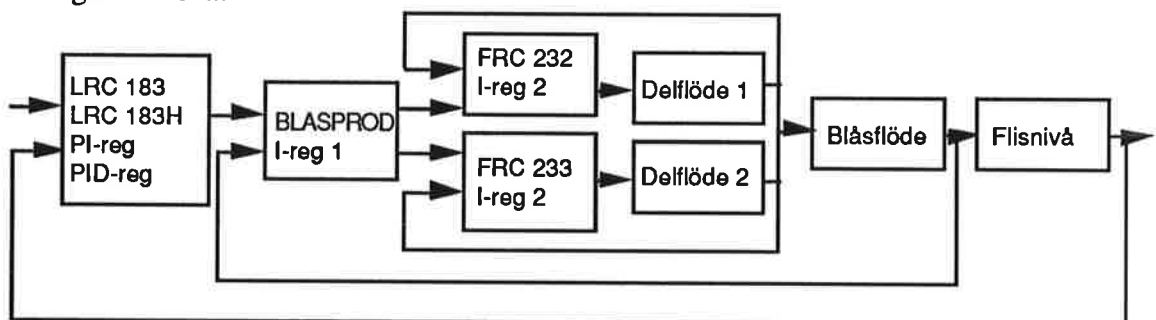


Fig 12. Flisnivåreglering på skoghallskokaren

För att tuna den verkliga processen ställdes inga andra regulatorer i manuell. Här skulle annars lutnivå-, ångfastemp- och/eller tryck-kretsarna kunna ha ställts i manuell, om problem uppstått.

Tuning utförs enligt kapitel 4.3.

Först provade jag att utföra tuning med MODO-regulatorn (LRC 183H), men fick problem med den långa samplingstiden på 1 minut. Under tuningsfasen ändrar sig flisnivån ibland väldigt snabbt och det blev svårt att ändra styrsignalen vid rätt tid.

När jag kopplat över till TDC-regulatorn (LRC 183) med en samplingstid av 1 sekund, gick det bättre. Efter några dagars försök med utprovning av olika hysteres ( $\epsilon$ ), styrsignalsutslag ( $d$ ) och tider i ingångsfiltret ( $T_f$ ), samt väntat på att produktionstörningar skulle upphöra, lyckades jag utföra några tuningar. Det visade sig viktigt, att vänta till "rätt tillfälle". En annan sak jag upptäckte var att ändringar av

mängden inmatad flis i kokeriet, omräknat till färdig massa, är framkopplat till styrsignalen, blåsflödet, i MODO-regulatorn men ej i TDC-regulatorn, detta påverkar naturligtvis i hög grad uppförandet vid produktionsändringar.

Vad gäller ingångsfiltret, fastnade jag för ett första ordningens lågpasfilter med en tidskonstant ( $T_f = 3\text{min}$ ) mot ursprungligen ( $T_f = 0.5\text{min}$ ). Hysteresen valdes till ( $\varepsilon=2\%$ ) och styrsignalens reläutslag till ( $d=2\text{ton/timme}=4\%$  av maximalt utslag). Här gäller inga bestämda regler utan det är bara att prova sig fram och lära av misstagen. Viktigt är att samråda med driftspersonalen, ty de har ofta väldigt god uppfattning om processens uppförande. Då sparas mycken tid och risken för misstag minskar.

Av några lyckade försök valde jag ut det mest förtroendeingivande, se diagram 1, här uppmättes och beräknades medelvärdena av processamplituden ( $a=6.31$ ) och kritiska tidsperioden ( $t_c=27.7\text{min}$ ). Detta gav ( $K_c=0.81$ ) och ( $\theta=18.5^\circ$ ).

Vid ett annat försök blev ( $a=7.15$ ) och ( $t_c=30\text{min}$ ), vilket gav ( $K_c=0.71$ ) och ( $\theta=16.2^\circ$ ). Inte så stor skillnad.

Sedan räknades parametrar ut enligt 36, 37 och 38, eftersom TDC-regulatorn är på serieform enligt 25. För att få motsvarande regulatorparametrar i MODO-regulatorn vilken är implementerad på specialformen

$$\left( P_m + \frac{I_m}{s} + D_m \cdot s \right) \quad (48)$$

måste identifiering av parametrarna utföras. Först jämföres med den normala parallellformen enligt 5. Dessutom måste hänsyn tagas till att TDC-regulatorns utsignal alltid har området (0 - 100%) och sedan omvandlas till strömsignal 4mA till 20mA. Medan MODO-regulatorn räknar direkt i aktuell enhet, i detta fall 0—50ton/h. Det är förstärkningen i systemet som blir olika. För att underlätta mitt arbete då jag skulle prova flera olika parameterinställningar på de olika systemen, härledde jag följande omräkningsformler.

Omräkning göres genom identifiering av 5 och 48 samt insättning i 26, 27 och 28 respektive 30, 31 och 32.

Omräkning TDC  $\rightarrow$  MODO

$$P_m = \frac{P_p(50-0)}{100-0} = \frac{P_p}{2} = \frac{P_s \cdot (I_s + D_s)}{I_s} \quad (49)$$

$$I_m = \frac{P_p}{2 \cdot I_p} = \frac{P_s}{2 \cdot I_s} \quad (50)$$

$$D_m = \frac{P_p \cdot D_p}{2} = \frac{P_s \cdot D_s}{2} \quad (51)$$

Omräkning MODO → TDC

$$P_s = P_m \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D_m}{I_m} \right)^2} \right] \quad (52)$$

$$I_s = \frac{P_m}{2 \cdot I_m} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D_m}{I_m} \right)^2} \right] \quad (53)$$

$$D_s = \frac{P_m}{2 \cdot I_m} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D_m}{I_m} \right)^2} \right] \quad (54)$$

Mätningar med ( $T_f=3\text{min}$ ), ( $d=2\text{ton/h}=4\%$ ) och ( $\epsilon=2\%$ ) gav ( $a=6.31\%$ ) och ( $t_c=27.7\text{min}$ ).

Processens "fingeravtryck" kan då räknas ut med 1 och 8. Processens kritiska förstärkning blir ( $K_c=0.81$ ) och dess fas ( $\theta=18.5^\circ$ ) samt kritiska tidsperioden ( $t_c=27.7\text{min}$ ).



Regulatorparametrar räknades ut, på förprogrammerad miniräknare, enligt 36, 37, 38, 49, 50 och 51 med olika  $A_m$  och  $\phi_m$ , enligt tabell 1. Vidare fixeras ( $\alpha_s = 4$ ).

$A_m$	$\phi_m$	typ	$P_s$	$I_s$	$D_s$	$P_m$	$I_m$	$D_m$	Anm
2	30°	PID	0.316	11.35	2.836	0.1977	0.0139	0.4486	
2	45°	PID	0.289	15.89	3.973	0.1805	0.0091	0.5739	Reg2
2	60°	PID	0.242	22.91	5.727	0.1511	0.0053	0.6922	
2	75°	PID	0.178	35.52	8.880	0.1113	0.0025	0.7907	
2	--	PI	0.404	17.63	0	0.2018	0.0114	0	
4	30°	PID	0.158	11.35	2.836	0.0989	0.0070	0.2243	
4	45°	PID	0.144	15.89	3.973	0.0903	0.0045	0.2869	Reg3
4	60°	PID	0.121	22.91	5.727	0.0755	0.0026	0.3461	
4	75°	PID	0.089	35.52	8.880	0.0557	0.0013	0.3954	
4	--	PI	0.202	17.63	0	0.1009	0.0057	0	
6	30°	PID	0.105	11.35	2.836	0.0659	0.0046	0.1495	
6	45°	PID	0.096	15.89	3.973	0.0602	0.0030	0.1913	
6	60°	PID	0.081	22.91	5.727	0.0504	0.0018	0.2307	
6	75°	PID	0.059	35.52	8.880	0.0371	0.0008	0.2636	
6	--	PI	0.135	17.63	0	0.0673	0.0038	0	
8	30°	PID	0.079	11.35	2.836	0.0494	0.0035	0.1122	
8	45°	PID	0.072	15.89	3.973	0.0451	0.0023	0.1435	
8	60°	PID	0.060	22.91	5.727	0.0378	0.0013	0.1731	
8	75°	PID	0.045	35.52	8.880	0.0278	0.0006	0.1977	
8	--	PI	0.101	17.63	0	0.0504	0.0029	0	Reg4
10	30°	PID	0.063	11.35	2.836	0.0395	0.0028	0.0897	
10	45°	PID	0.058	15.89	3.973	0.0361	0.0018	0.1148	
10	60°	PID	0.048	22.91	5.727	0.0302	0.0011	0.1384	
10	75°	PID	0.036	35.52	8.880	0.0223	0.0005	0.1581	
10	--	PI	0.081	17.63	0	0.0404	0.0023	0	
Ursprunglig PI			0.08	20.0	0	0.04	0.002	0	Reg1

Tabell 1. Regulatorparametrar med olika  $A_m$  och  $\phi_m$ .

I tabell 1 syns att ECA 400 design har alldeles för liten amplitudmarginal ( $A_m=2$ ) jämfört med den ursprungliga, väl fungerande regulatorn Reg1 ( $A_m=10$ ). Medan däremot I-tiden stämmer väl överens.

Diagram 1 visar först 5 timmars körning med den ursprungliga MODO-regulatorn (Reg1), med ( $T_f=0.5$ min). Det visar att processen har väldigt lite störningar, och allt går bra, notera de mycket små styrsignalsändringarna (blåsflödet) vid de störningar som förekommer. Det är viktigare att hålla jämt utflöde ur kokaren än att hålla jämn nivå. Det gäller att hitta rätt kompromiss.

Sedan följer själva tuningen, vilken varade nästan 3 timmar. Här ändrades även filterkonstanten till ( $T_f=3$ min).

Därefter körs ca två timmar med en PID-regulator i TDC-systemet designad enligt "ECA400" (Reg2) där ( $A_m=2$ ) och ( $\phi_m=45^\circ$ ). Denna design visar sig ge för stora styrsignalsändringar.

Då provas en regulator enligt ( $A_m=4$ ) och ( $\varphi_m=45^\circ$ ), Reg3, det är denna inställning som syns sist på diagram 1 och hela diagram 2. Att hålla flisnivån jämn går ganska bra, men fortfarande görs för stora styrsignalsändringar vid störningar, väl att märka att det är ovanligt lite störningar under på dessa två diagram, visande 30 timmars körning.

Tillbaka någon vecka senare, då en design med ( $A_m=8$ ) och ( $\varphi_m=45^\circ$ ) skulle provas, beslutar jag att använda PI-design, Reg4. Eftersom det denna gång är betydligt större störningar i processen. Se diagram 3. Här syns att långa stunder hålls nivån bra. Styrsignalsutslagen är också på en rimlig nivå, med tanke på de stora störningarna i processen.

Således kan regulatorer lämpliga för flisnivåreglering designas enligt Hägglund-Åströms relämetod. Lämpliga områden att prova är för amplitudmarginalen 6 - 10, medan fasmarginalen bör ligga i området  $45-60^\circ$ . Det kan i vissa fall vara lämpligt med enbart PI-design.

Reg1(MODO)	Tuning(TDC)	Reg2(TDC)	Reg3(TDC)
$T_f = 1 \text{ min}$	$T_f = 3 \text{ min}$	$T_f = 3 \text{ min}$	$T_f = 3 \text{ min}$
$P_m = 0.04$	$a = 6.31$	$P_s(A_m=2) = 0.29$	$P_s(A_m=4) = 0.14$
$I_m = 0.02$	$\epsilon = 2 \%$	$I_s = 16 \text{ min}$	$I_s = 16 \text{ min}$
$D_m = 0$	$d = 4 \%$	$D_s = 4 \text{ min}$	$D_s = 4 \text{ min}$
	$t_c = 27.7 \text{ min}$		

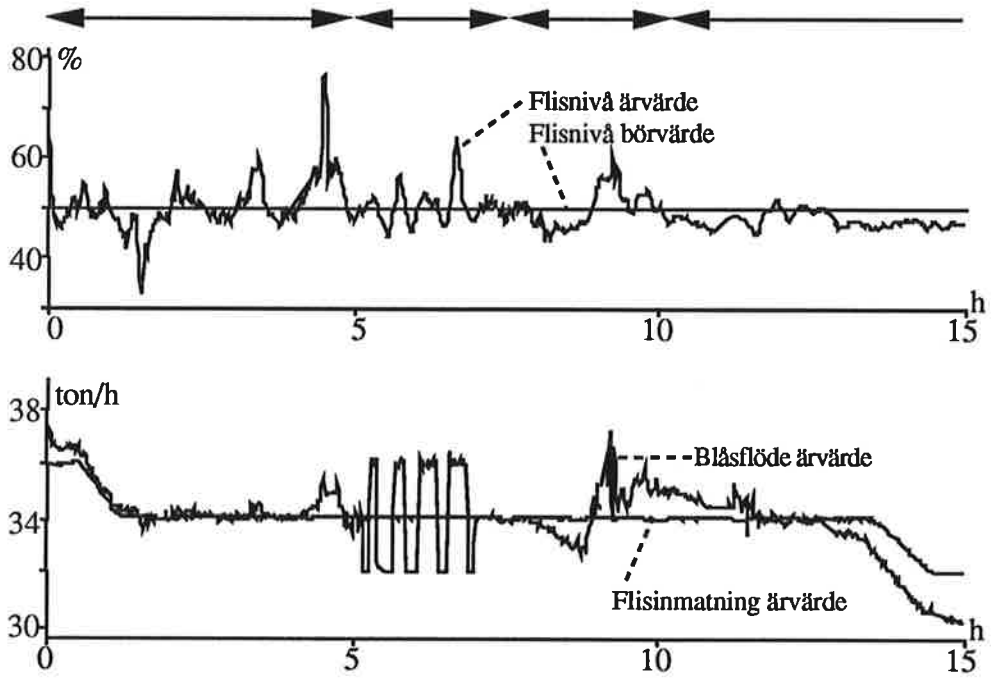


Diagram 1.

Reg3

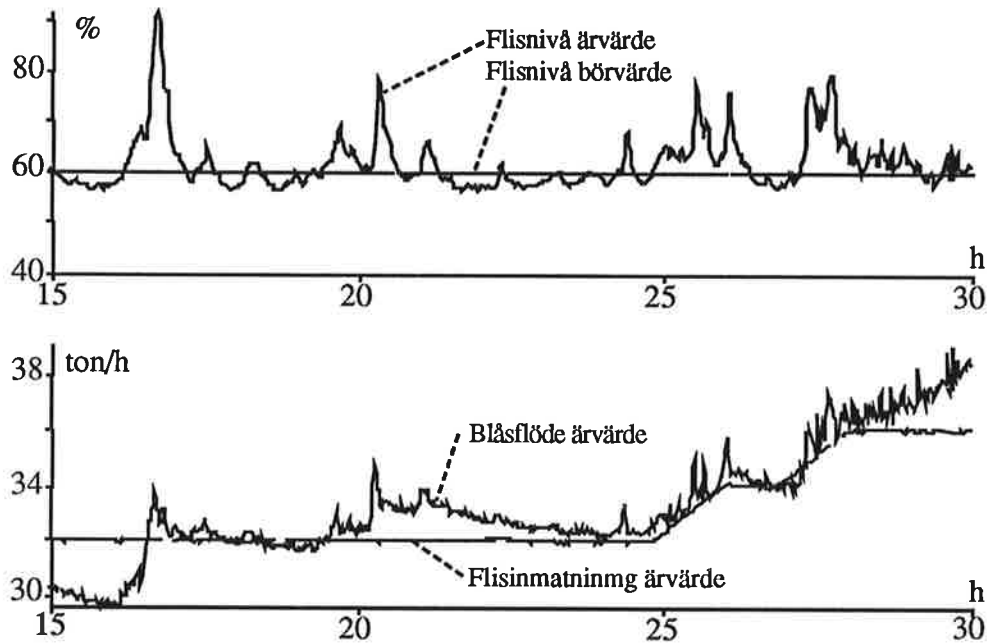


Diagram 2.

Reg4(MODO)  
 $T_f = 3 \text{ min}$   
 $P_m(A_m=8) = 0.05$   
 $I_m = 0.03$   
 $D_m = 0$

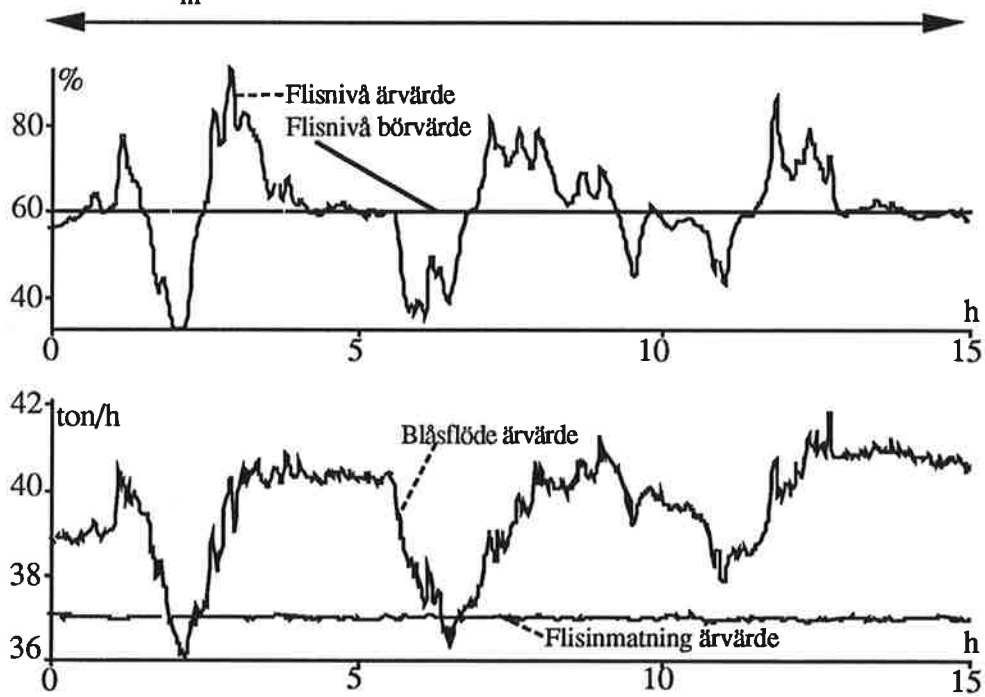


Diagram 3.

## 5.2. Bäckhammars bruk

Bäckhammars bruk ligger ca 2 mil söder om Kristinehamn. Den kontinuerliga sulfatkokaren producerar ca 450ton sulfatmassa per dygn. Merparten av denna massa används i det integrerade kraftpappersbruket.

Styrutrustningen består av Foxboro luftregulatorer, och ett överordnat Kamyrs styrsystem. Då här regulatorerna är av enloopstyp, är det enkelt att koppla in andra regulatorer att prova med. De tre kretsar, flisnivå, lutnivå och ångfastemperatur, vilka har testkörts har alla samma struktur. De är kaskadkopplade med en flödesregulator se fig 13. De regulatorer vilka provats är ECA 400 i yttre loop och ECA 40 i inre loop. Det hade även gått att enbart använda en ECA 400 då den har inbyggd kaskad med yttre och inre regulator, men jag valde två regulatorer eftersom jag önskade logga och kunna begränsa signalen mellan regulatorerna,  $u_{400}$  till  $r_{40}$ . Detta är ej möjligt med endast en ECA 400, ty denna signal går ej att styra ut på någon av de analoga utgångarna.

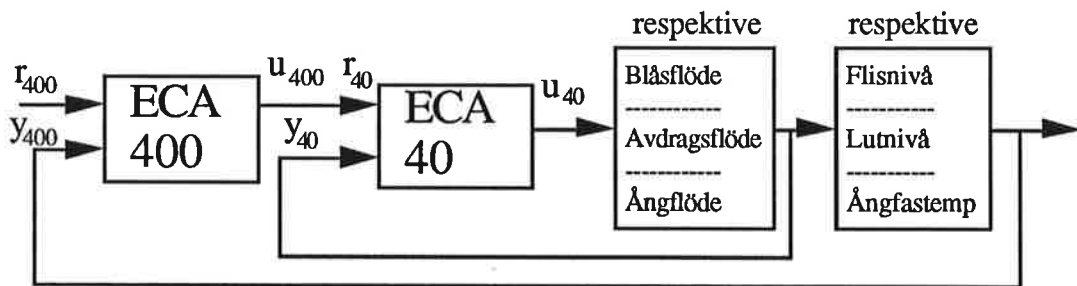


Fig 13. Konfiguration för flisnivå, lutnivå respektive ångfastemperatur.

Auto-tuning av respektive flödeskrets gick som väntat helt utan problem, och med val av filterkonstant till ( $T_{f-ECA40} = 2s$ ) valdes i alla tre fallen design med PID-regulator. Hade brusnivån varit hög hade här regulatorn istället valt PI-design. Storleken på styrsignalen ( $d$ ) gick bra att ha till både 5% och 10% medan 3% var i minsta laget.

När en kaskadkrets tunas börjar man alltid med den inre kretsen, i detta fall flödesloopen. Då bör ECA 40 ställas om från "remote" till "local". Sedan väljs filterkonstant ( $T_f$ ) och tuningsknappen aktiveras. När flödesregleringen är till belåtenhet ställs ECA 40 i "remote".

Då kan den yttre ECA 400 tunas, efter att lämpligt filter ( $T_f$ ) valts.

Ett flertal tuningar utfördes och gav oftast liknande resultat.

Alla tuningar utfördes utan att någon annan av kokarens övriga kretsar ställdes i manuell.

I efterföljande avsnitt 5.2.1.-3. hänvisar jag, för enkelhetens skull, inte alltid till ett diagram utan ibland till anmärkningarna ovanför diagrammen.

### 5.2.1. Flisnivå

ECA400 och ECA40 kopplades in på flisnivåkretsen se fig 4 och fig13.

Resultaten av flisnivåtuning finns i diagram 4 - 9.

Först tunades blåsfloresregulatorn (ECA 40) några gånger med likartade resultat. Med filterkonstanten ( $T_f=2s$ ), styrsignalsutslaget maximerat till ( $d=5\%$ ) och normal regulatordesign blev parametrarna ( $P_s(A_m=2)=1.54$ ,  $I_s=13s$  och  $D_s=3.2s$ ). Med bra resultat. Ursprunglig Kamyr-regulator är inställd ( $T_f=15s$ ,  $P_p=1$ ,  $I_p=60s$  och  $D_p=0s$ ), vilken även den klarar regleruppgiften på hyggligt vis, trots den stora skillnaden i parametrar.

Värre blev det när själva flisnivåregulatorn skulle tunas. På grund av de många och stora störningarna, blev reläomslagen lite osäkra, trots kraftig filtrering. Prov gjordes med olika filterkonstanter, bäst resultat med ( $T_f=360s$ ).

Problemet bestod i att regulatorn valde alldeles för liten hysteres ( $\epsilon$ ) i förhållande till störningarna. Filtringen gjorde att hysteresen valdes liten då de högfrekventa störningarna filtrerats bort, medan de lågfrekventa blev kvar. Dessa lågfrekventa störningar kommer ej med i brusskattningen, ty den mäter bruset under endast 10s. I detta fall borde tagits hänsyn till störningar under kanske en timmes tid.

Problemet kan lösas om möjlighet finnes att ställa hysteresen manuellt före tuning. Genom att betrakta trendkurvor fås en bra uppskattning av de lågfrekventa störningarnas amplitud, och lämplig hysteres kan väljas. Ett annat betydligt omständigare alternativ är naturligtvis att ändra på brusskattningen i regulatorn.

Om större hysteres kunnat väljas, hade mycket säkrare reläomslag erhållits och inga extra omslag, beroende på störningar, hade uppkommit, se diagram 5 och 6. Ett exempel är diagram 6, tuning 13 vid tiden ( $h=2.6$ ) då ett extra dubbelomslag orsakas av störning, trots kraftig filtrering. Större hysteres hade säkert klarat av detta. Resultat av dessa extra omslag kan ge för korta periodtider och fel förstärkning, om de sker i slutfasen av tuningen. Det syns då det skiljer en del i parametrarna mellan de olika tuningarna.

Vid tuning av flisnivån valde ECA 400 en hysteres ( $\epsilon$ ) i intervallet 0.5%-1%, då hysteresen borde varit kanske 5%-10% istället, med tanke på störningarnas omfattning. Observera att det är filtrerade signaler som är plottade, det hade blivit för otydliga diagram med även de icke filtrerade signalerna.

Det förekommer att tuning ej går att genomföra på grund av detta problem, dessutom finns osäkerhet om ett reläomslag orsakats av processen eller störning.

Nu lyckades trots allt några tuningar, exempelvis tuning 14 och 15 gav likartad design. För referenskörning valdes design från tuning 16 där styrsignalsamplituden begränsades till ( $d=3\%$ ), detta ger lugnare regulator än med ( $d=5\%$ ). Dessutom ändrades regulatorns (Reg15) förstärkning från ( $P_s(A_m=2)=0.25$ ) till ( $P_s(A_m=8)=0.0625$ ) för att få amplitudmarginalen 8 istället för 2. Denna ändring för att få lagom stora ändringar av styrsignalen (blåsfloret).

Det var även planerat att köra med regulator enligt tuning14 eller 15, fast med ( $A_m=8$ ), under längre tid, men tidsbrist hindrade detta.

En ändring av amplitudmarginalen till ( $A_m=8$ ) motiveras av blåsflorets uppträdande i diagram 4, reg11 där ( $A_m=2$ ) och flisnivån hålls på ett utmärkt sätt, medan blåsfloret ökar ända upp till 50l/s. Normalt är blåsfloret begränsat till exempelvis området 39-

41.5 l/s, ett mycket litet område. Används då en regulator med hög förstärkning, blir reglerfunktionen dålig ty styrsignalen arbetar då som ett relä mellan styrsignalsgränserna. Att ha ett sådant litet område att styra på motiveras av processtekniska skäl. Den valda regulatorn (Reg14) stämmer ganska väl med ursprunglig regulator (Reg16), där derivatadelen ej är med.

Eftersom denna regulatorinställning (Reg14) provades nattetid, räknades parametrarna om från serieform (ECA400,Reg15) till parallellform (KAMYR-regulator,Reg14) enligt 26, 27 och 28. Resultatet i diagram 8 ser väldigt bra ut, då styrsignalen ej går mot begränsningarna under någon längre tid, och flisnivån hålls bra. Tilläggas bör att den ändring i styrsignalen som syns vid tiden ( $h=9$ ) orsakas av operatören, vilken måste köra kokaren för hand ett tag p g av att en pump i en värmeväxlarcirkulation stannat.

En loggning under jämförbara förhållanden med ursprunglig regulator (Reg16), se diagram 9, visar likartat uppträdande. Det finns således ingen anledning att ta bort derivatadelen, vilket ofta sker.

Slutsats blir att om ECA400 anpassas till dessa speciella kretsar, genom möjlighet att förvälja hysteres ( $\epsilon$ ) och amplitudmarginal ( $A_m$ ) till lämpliga värden, borde processen gå bra att Auto-tuna. Önskvärt vore möjlighet, att även kunna välja fasmarginalen ( $\phi_m$ ). En följd av att kunna välja större hysteres ( $\epsilon$ ) blir att kortare filterkonstant kan väljas. Detta ger snabbare respons på nivåändringar. I detta fall kan då troligen filtret minskas från ( $T_f=360s$ ) till ( $T_f=180s$ ).

ECA400 Manuell  
Tuning1 ECA400

Tuning11(ECA400)  
 $T_f=180s$   
 $d=5\%$   
 $\epsilon=1\%$

Reg11(ECA400)  
 $T_f=180s$   
 $P_s(A_m=2)=0.27$   
 $I_s=316s$   
 $D_s=79s$

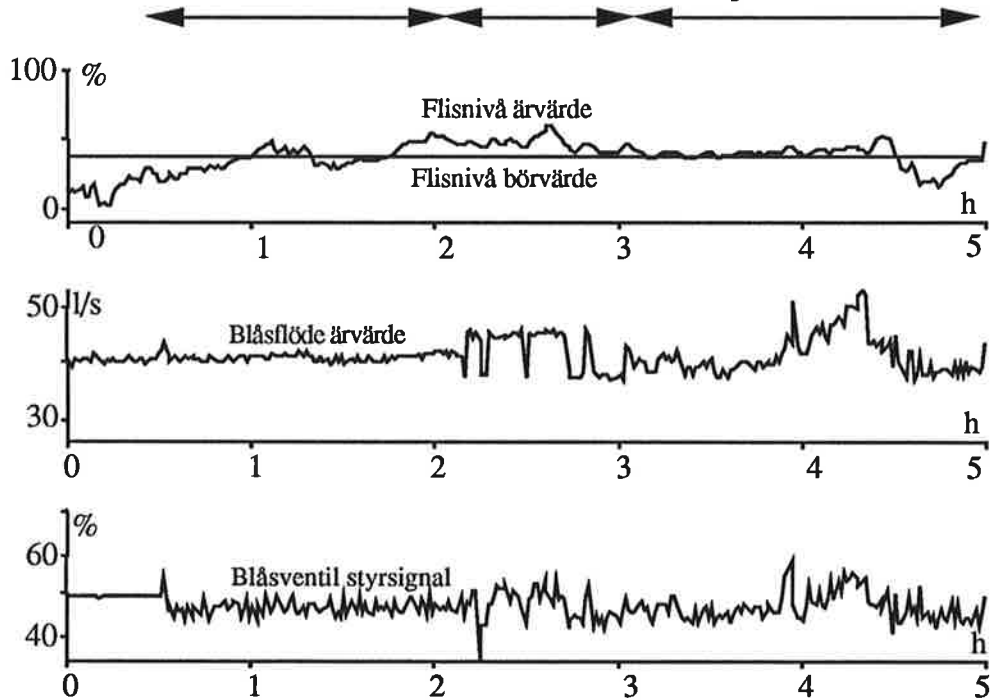


Diagram 4.

Tuning12(ECA400)  
 $T_f=360s$   
 $d=5\%$   
 $\epsilon=0.7\%$   
 $K_c=1.43$   
 $t_c=943s$

Reg12(ECA400)  
 $T_f=360s$   
 $P_s(A_m=8)=0.11$   
 $I_s=768s$   
 $D_s=192s$

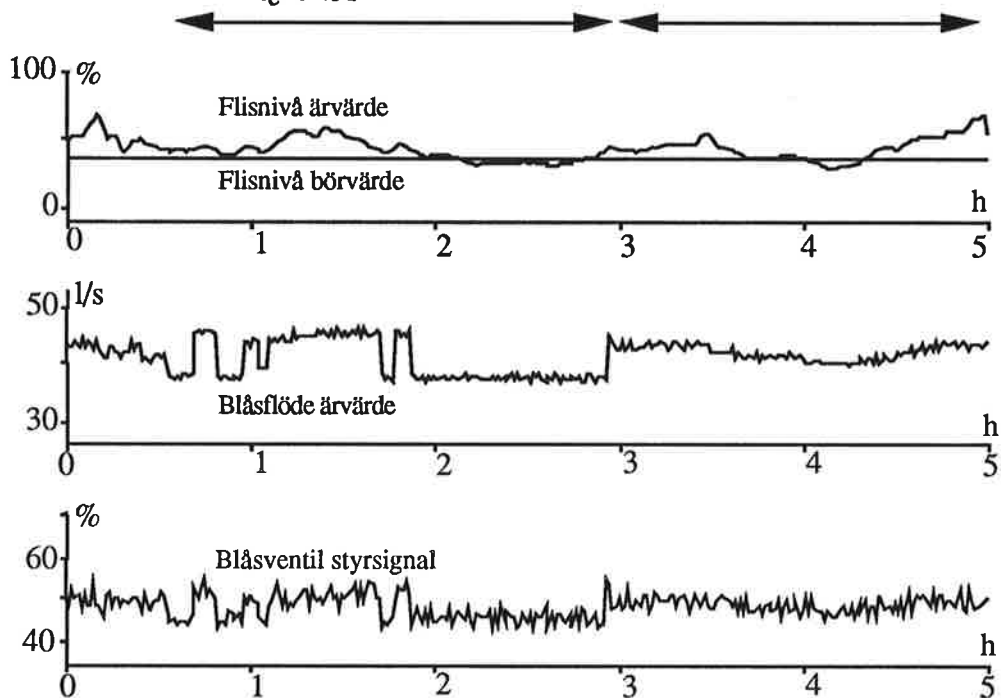


Diagram 5.



ECA400 Manuell  
Tuning2 ECA40

Tuning13(ECA400)  
 $T_f=360s$   
 $d=10\%$   
 $\epsilon=0.6\%$   
 $K_c=3.26$   
 $t_c=923$

Reg13(ECA400)  
 $T_f=360s$   
 $P_s(A_m=8)=0.27$   
 $I_s=635s$   
 $D_s=159s$

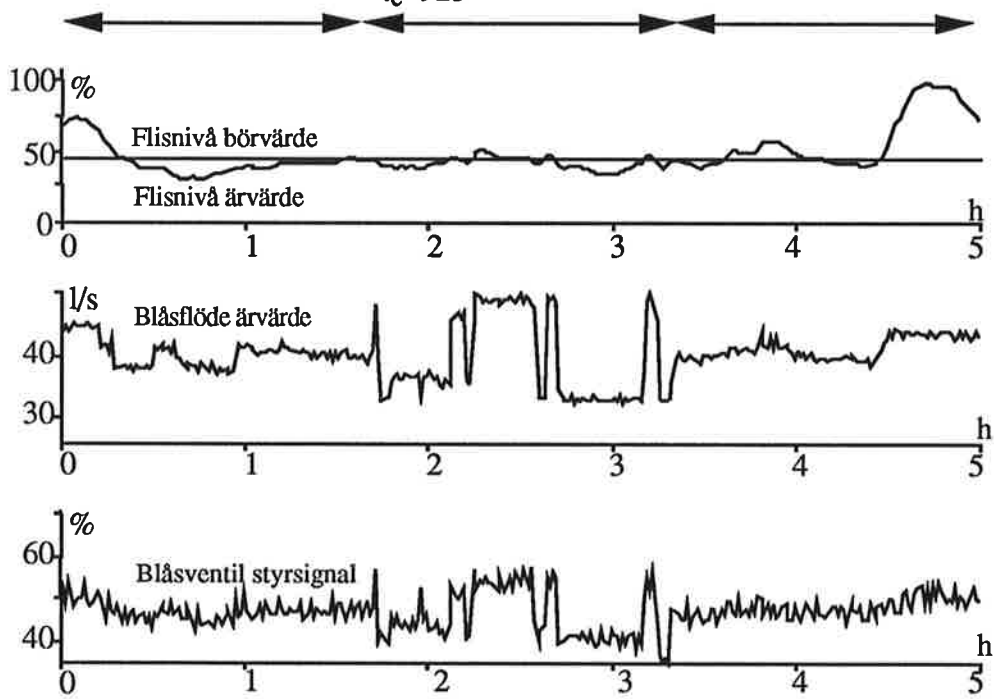


Diagram 6.

Reg12(ECA400)

Tuning14  
 $T_f=360s$   
 $d=5\%$   
 $\epsilon=0.6\%$   
 $K_c=2.25$   
 $t_c=753$

Tuning15  
 $T_f=360s$   
 $d=5\%$   
 $\epsilon=0.6\%$   
 $K_c=2.4$   
 $t_c=716$

Tuning16  
 $T_f=360s$   
 $d=3\%$   
 $\epsilon=0.5\%$   
 $K_c=0.27$   
 $t_c=995$

Tuning17  
 $T_f=360s$   
 $d=3\%$   
 $\epsilon=0.5\%$   
Misslyckad

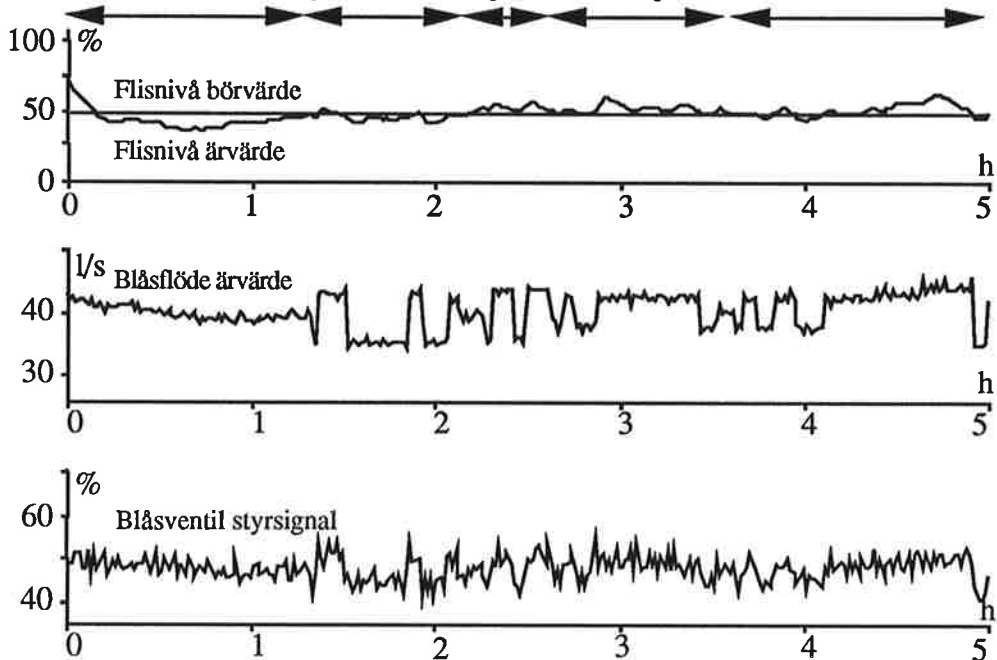


Diagram 7. Tuning med ECA400 på flisnivåreglering.

Reg14(KAMYR)	=	Reg15(ECA400)
$T_f=360s$		$T_f=360s$
$P_p(A_m=8)=0.08$		$P_s(A_m=8)=0.0625$
$I_p=965s$		$I_s=772s$
$D_p=154s$		$D_s=193s$

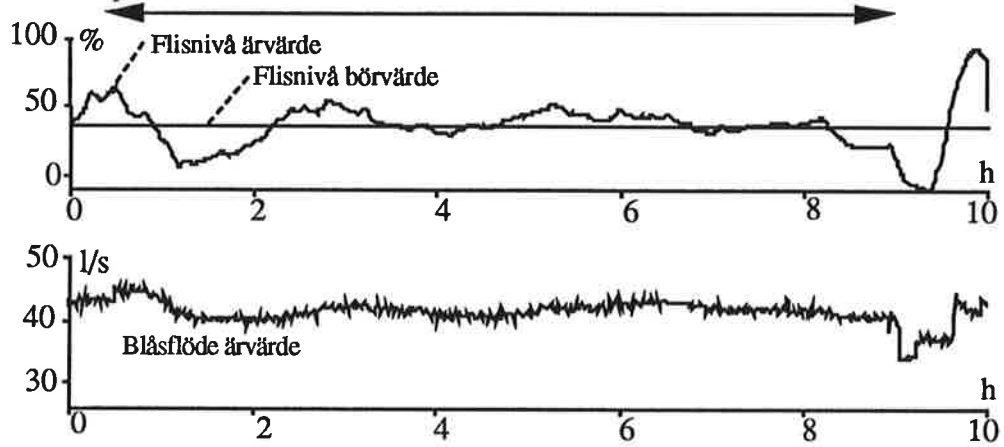


Diagram 8.

Reg16(KAMYR)
$T_f=30s$
$P_p=0.08$
$I_p=1200s$
$D_p=0s$

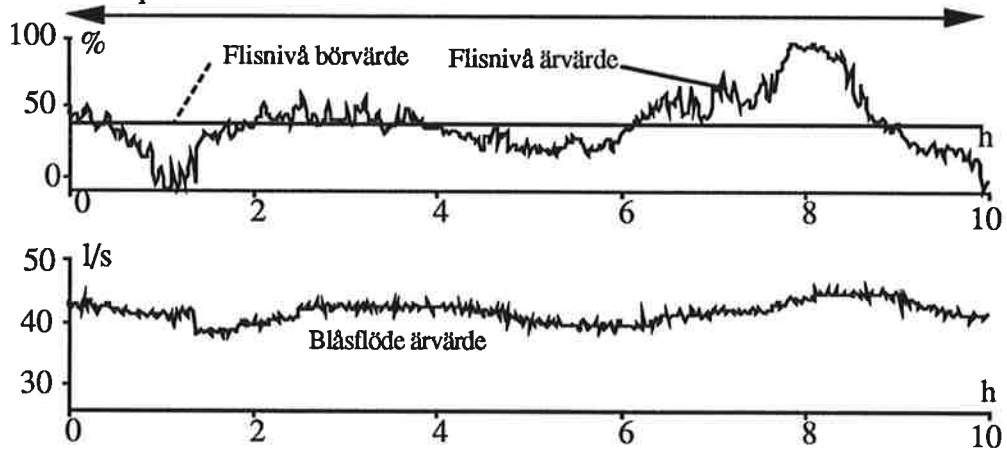


Diagram 9.

### 5.2.2. Lutnivå

Även på lutnivåkretsen kopplades ECA400 och ECA40 in, se fig 5 och 13 samt diagram 10 och 11.

Först tunades avdragsflödesregulatorn (ECA40) med några olika filterkonstanter, bäst resultat uppnåddes med ( $T_f=2s$ ), vilket gav regulatordesign ( $P_s(A_m=2)=2$ ,  $I_s=8.5s$  och  $D_s=2.1s$ ). Ursprunglig Foxboro PI-luftregulator, var inställd på ( $P=0.4$  och  $I=3s$ ).

En tuning av lutnivåregulatorn (ECA400) med filterkonsten  $T_f=20s$  gav Reg21, med tämligen dåligt resultat.

Ny tuning (tuning21) med ( $T_f=10s$ ) gav då bättre resultat. Provkörning skedde med design enligt olika amplitudmarginal, där syns att Reg22 ( $A_m=2$ ) har onödigt stora styrsignaländringar. Reg23 ( $A_m=6$ ) ger nästan lika bra nivåhållning, men betydligt mindre ändring av styrsignalen. Allra bäst blev Reg24 ( $A_m=8$ ), vilken håller nivån bra och ger små styrsignaländringar. Det passar denna process väldigt bra.

Vid jämförelse med ursprunglig regulator (Reg25), konstateras att alla inställningar utom Reg21 ger bättre resultat.

För att anpassa ECA400 till denna krets bör det vara möjligt att ställa in önskad amplitudmarginal ( $A_m$ ). I detta fall ställde inte den lilla hysteresen ( $\epsilon=0.5\%$ ) till något besvär, ty lutnivån har ej tillnärmelsevis lika stora störningar som flisnivån.

Reg21(ECA400)  
 $T_f=20s$   
 $P_s(A_m=6)=2.02$   
 $I_s=965s$   
 $D_s=154s$

Tuning21(ECA400)  
 $T_f=10s$   
 $\epsilon=0.5\%$   
 $d=10\%$   
 $K_c=14.78$   
 $t_c=279$

Reg22(ECA400) Reg23  
 $T_f=10s$   
 $P_s(A_m=2)=5.83$   
 $I_s=110s$   
 $D_s=27s$

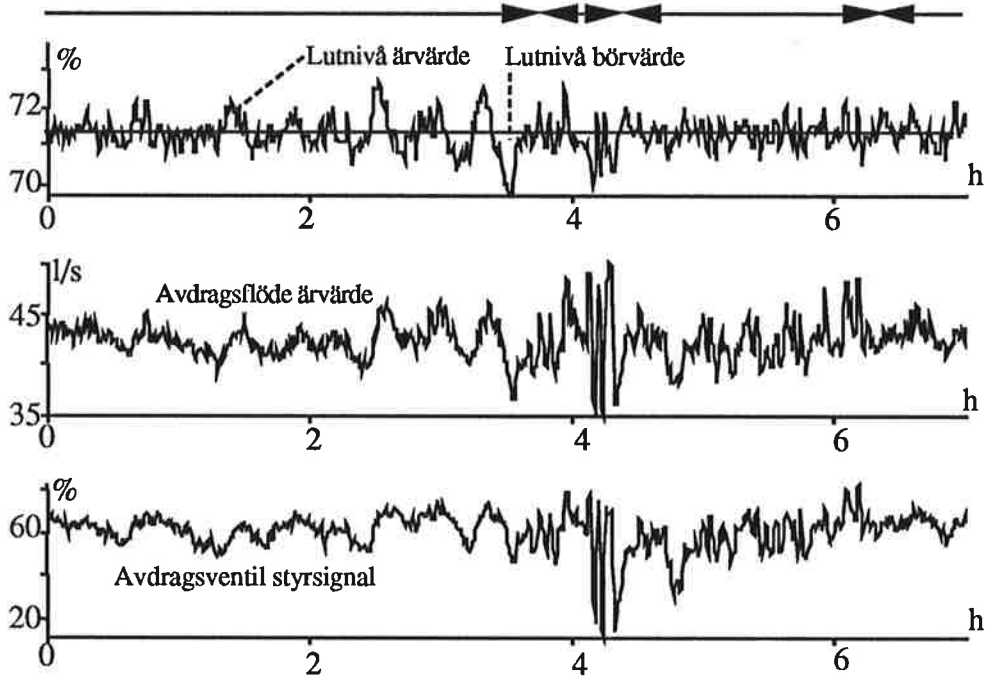


Diagram 10

Reg23(ECA400)  
 $T_f=10s$   
 $P_s(A_m=6)=1.94$   
 $I_s=110s$   
 $D_s=27s$

Reg24(ECA400)  
 $T_f=10s$   
 $P_s(A_m=8)=1.58$   
 $I_s=110s$   
 $D_s=27s$

Reg25(KAMYR)  
 $T_f=180s$   
 $P_p=2.0$   
 $I_p=1200s$   
 $D_p=0s$

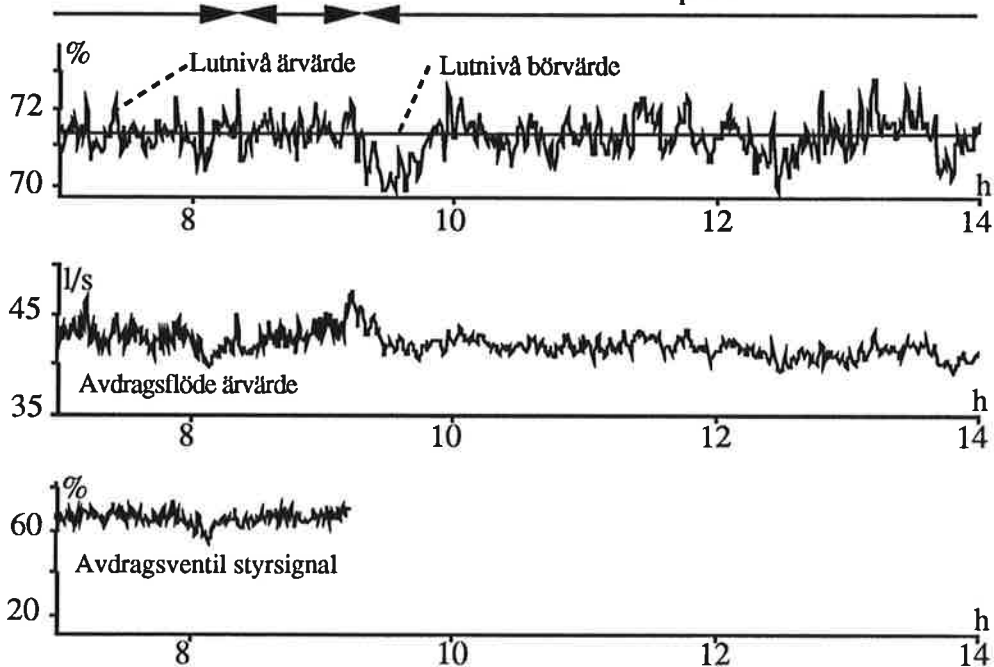


Diagram 11.

### 5.2.3. Ångfasttemperatur

Som avslutning provades även tuning av ångfasttemperaturen med ECA400 och ECA40, fig 6 och 13. Resultaten finns i diagram 12 och 13.

Tuning av flödeskretsen ECA40 med ( $T_f=2s$ ) gav bra resultat med parametrarna ( $P_s(A_m=2)=0.44$ ,  $I_s=12s$  och  $D_s=3s$ ). Här var Foxboro-regulatorn inställd enligt ( $P=0.4$  och  $I=12s$ ), inte så olik design.

Efterföljande tuning med ECA400 (Tuning31) av temperaturkretsen med ( $T_f=5s$ ) gav parametrarna ( $P_s(A_m=2)=1.51$ ,  $I_s=149s$  och  $D_s=37s$ ), (Reg31), med mycket gott resultat.

Ytterligare en tuning av flödeskretsen ECA40 fast denna gång med design "långsam", där amplitudmarginalen är 4 istället gav ( $P_s(A_m=4)=0.22$ ,  $I_s=12s$  och  $D_s=3s$ ).

Detta gav i sin tur återverkningar på temperaturregulatorns (ECA400) efterföljande tuning ( $P_s(A_m=2)=1.38$ ,  $I_s=166s$  och  $D_s=41s$ ), (Reg32).

På denna krets fungerade de normala designreglerna i både ECA40 och ECA400 utmärkt och gav betydligt mindre temperaturvariationer, men även mindre ändringar av styrsignalen (ångflödet), än ursprunglig KAMYR-regulator enligt ( $P_p=0.8$ ,  $I_p=450s$  och  $D_p=0s$ ), (Reg33).

Här visas också vilken nytta det gör att ha med derivatadelen i regulatorn. Små styrsignaländringar i rätt tid, innan felet blir för stort.

Tuning31(ECA400)	Reg31(ECA400)	Tuning32(ECA400)	Reg32(ECA400)
$T_f=5s$	$T_f=5s$	$T_f=5s$	$T_f=5s$
$d=5\%$	$P_s(A_m=2)=1.51$	$d=5\%$	$P_s(A_m=2)=1.38$
$\epsilon=0.7\%$	$I_s=149s$	$\epsilon=0.7\%$	$I_s=166s$
	$D_s=37s$		$D_s=41s$

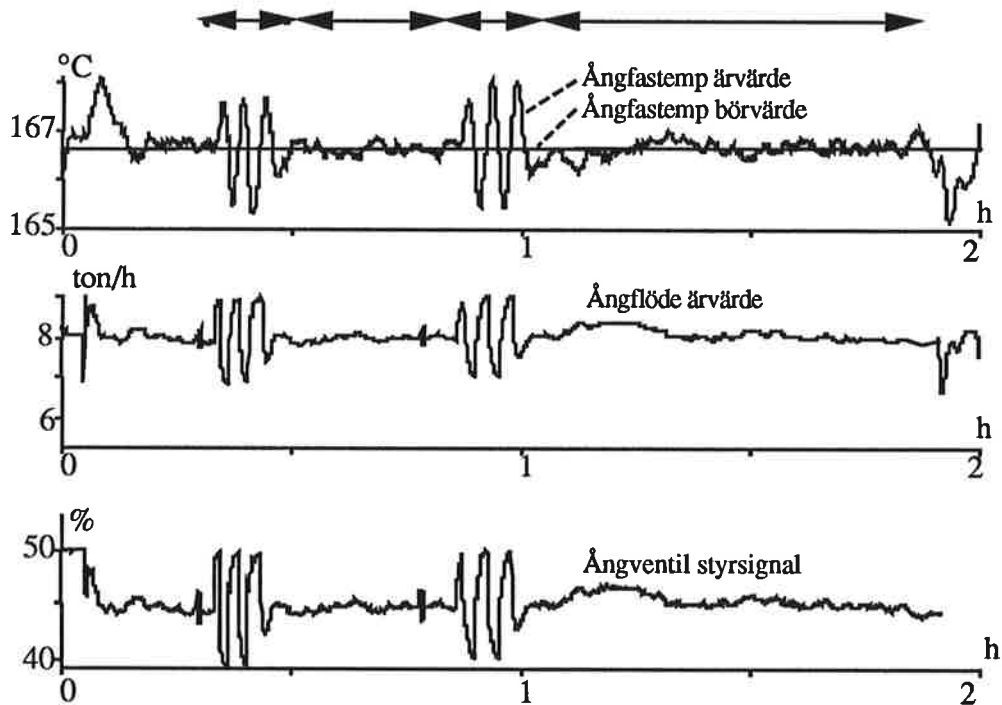


Diagram 12.

Reg33(KAMYR)  
 $T_s=5s$   
 $P_p=0.8$   
 $I_p=450s$   
 $D_p=0s$

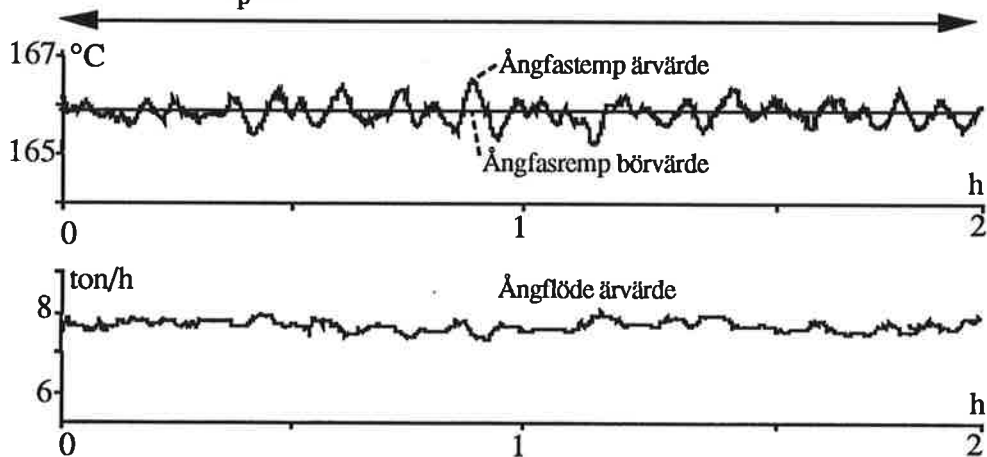


Diagram 13. Anm: Styrsignal loggas ej från Kamyrrregulator.

## 6. Slutsatser och kommentarer

### 6.1. Anpassning av ECA 400 till massakokerier

Studien visar att Auto-tuning med, en något modifierad, ECA400 borde gå att använda på alla kretsar i kokeriet, då de undersökta kretsarna tillhör de allra svåraste.

Både ECA400 och ECA40 fungerade i övrigt utmärkt, klar och tydlig display och enkel att konfigurera. Uppskattningsvis 80—90% av kokeriets kretsar borde gå att tuna med nuvarande utförande av ECA400 och ECA40. Det gäller alla flöden och de kretsar vilka ej har så mycket störningar.

Följande åtgärder föreslås på ECA400. Där 1 och 2, kanske även 3 är absolut nödvändiga. Nummer 4 för att kunna utnyttja alla frihetsgrader i en PID-regulator. Åtgärd 6 och 7 om kaskadkopplingen ska kunna utnyttjas till fullo.

1. Möjlighet att välja hysteres ( $\epsilon$ ) för hand, förslagsvis upp till 10%, kanske 20% i undantagsfall. Alternativt ändras brusskattningen så att även lågfrekventa störningar kommer med.
2. Möjlighet att välja vilken amplitudmarginal ( $A_m$ ) det återkopplade systemet önskas ha. Lämpligt område kan här vara 1.5 till 12. Detta är speciellt viktigt om regulatorn ska köras adaptivt.
3. Möjlighet att välja fasmarginal ( $\phi_m$ ) på det återkopplade systemet. Intervallet föreslås här vara  $30^\circ$  till  $75^\circ$ . Ges möjlighet att välja amplitudmarginal ( $A_m$ ) bör även fasmarginalen ( $\phi_m$ ) kunna väljas.
4. Möjlighet att kunna välja förhållandet mellan I- och D-del ( $\alpha$ ), vilket nu är fastlåst till ( $\alpha_s=4$ ). Två, tre väl valda alternativ borde räcka. Anledningen är att det kan vara bra med lite mindre D-del vid mycket störningar, utan att för den skull gå ifrån design med önskad amplitud- och fasmarginal.
5. Möjlighet att kunna avläsa processens fasläge ( $\theta$ ), för att tillsammans med kritiska förstärkningen ( $K_c$ ) och tidsperiod ( $t_c$ ) kunna identifiera processen bättre. De två sistnämnda variabelerna finns redan tillgängliga som startvärden för den adaptiva regulatorn. Detta gör det även möjligt att utföra designberäkningar för hand.
6. Möjlighet att vid kaskadkörning kunna titta på den interna styrsignalen mellan yttre och inre regulator, även möjlighet att begränsa signalen.
7. Möjlighet att använda parameterstyrning även på inre regulatorn vid kaskadkoppling.
8. Dessutom har problem någon gång uppstått då ECA400 minskat reläamplitud, efter några reläomslag. Detta problem kanske bortfaller om möjlighet ges att sätta hysteresen för hand enligt 1, och därmed fixera reläamplituden ( $d$ ).
9. Vid något tillfälle har funnits behov av att kompensera för avdrift, genom att automatisk centrering av medelvärdet, kring vilket reläomslagen sker, efter några omslag.

Utförs dessa förändringar har man i ECA400 ett verkligt universalinstrument, vilket borde kunna tuna och styra alla processer, vilka överhuvudtaget kan styras med en PID-regulator. Man får då även möjlighet att bestämma kretsens uppförande.

## 6.2. Tuning för hand

Tuning för hand går bra vid väldigt långsamma processer, dessutom krävs möjlighet att tydligt läsa av, och plotta ut trendkurvor. Handtuning ger stor möjlighet att styra processens uppträdande då det är enkelt att ändra konstanter i designformlerna, exempelvis amplitud- och fasmarginal samt kvoten  $\alpha = I\text{-del}/D\text{-del}$ .

Som utgångsvärden använder man exempelvis design enligt ECA400, men sedan kan justering av amplitud- och fasmarginal behövas, om uppförandet ej blir bra.

Problem med handtuning är bristande noggrannhet.

Gör samma person lika var gång?

Får två personer samma resultat?

Viss känsla måste övas upp för val av hysteres ( $\epsilon$ ) och reläamplitud( $d$ ).



### 6.3. Val av designspecifikationer

Då möjlighet ges att välja de olika parametrarna  $T_f$ ,  $\epsilon$ ,  $d$ ,  $A_m$ ,  $\phi_m$ ,  $\alpha$  ska jag försöka sammanfatta, vad jag fått för erfarenheter i denna studien, på massakokare.

$T_f$  : Filterkonstanten på det första ordningens filter, vilket i första hand ska filtrera bort mätbrus. På alla flödeskretsar valdes 2s med gott resultat, här kan upp till 10s anses rimligt. Ett knep jag provade var, att välja filtret precis så stort att ECA40 valde PID-design istället för PI-design. De yttre kretsarna krävde betydligt längre filterkonstant. På flisnivån provades 180s till 360s, men här kompenserar lång filtertid i vissa fall en för liten hysteres ( $\epsilon$ ). Man får även längre kritisk tidsperiod ( $t_c$ ) med för stora filter. Lutnivån tunades bra med 10s, och ångfastemperaturen med 5s. Den yttre kretsen bör ha längre filter än den inre.

$\epsilon$  : Hysteresen, runt nollgenomgången på felet, väljes lite större än ärvärdets mätbrus och andra störningar. Val av hysteresen påverkar regulatordesignen på så vis att ökande  $\epsilon$  ger långsammare regulator, ty en annan punkt (A) väljes på Nyquistkurvan (se fig 11). För flisnivån verkar det nödvändigt att hålla sig i intervallet 2% till 10% på grund av mycket störningar. Vid de andra provade kretsarna inklusive flödena, räcker det med 0.5% till 1%, under förutsättning att lämpligt filter ( $T_f$ ) valts.

$d$  : Reläamplituden på styrsignalen är lämplig att på de provade kretsarna ha till 5%. Det går även bra med 10% medan 3% är i minsta laget. Även valet av reläamplituden påverkar regulatordesignen på så vis att ökande  $d$  ger snabbare regulator, ty en annan punkt (A) väljes på Nyquistkurvan (se fig 11).

$A_m$  : Amplitudmarginalen väljes lämpligen inom området 1.5 till 12, där ökande  $A_m$  ger långsammare reglering. Vid flödes- och temperaturkretsarna gick det bra med ( $A_m=2$ ) vilket ger snabb reglering och bra följdning av börvärdet, dessa kretsar har ej heller problem med stora styrsignaler. Nivåkretsarna däremot kräver betydligt lugnare uppförande och där tyckte jag ( $A_m=8$ ) gav bra resultat, med tanke på styrsignalens storlek, men ärvärdet hölls även inom godtagbara gränser. På de flesta kretsar kan man utgå från att ( $A_m=2$ ) blir bra.

$\phi_m$  : Fasmarginalen valdes i samtliga fall till  $45^\circ$ , med gott resultat. Bra resultat torde även erhållas i intervallet  $30^\circ$  till  $75^\circ$ .

$\alpha$  : Kvoten mellan integral- och derivatadel valdes i samtliga fall till ( $\alpha_s=4$ ) vilket motsvarar ( $\alpha_p=6.25$ ). Här finns andra tumregler värda att prova exempelvis ( $\alpha_s=1$ ) resp ( $\alpha_p=4$ ), men även större värden på  $\alpha$  vore intressanta. Större värden på  $\alpha$  ger mindre derivatadel i förhållande till integraldelen och därmed mindre känslighet för störningar.

## 6.4. Förslag till framtida arbete

Det ligger ett omfattande utprovningsarbete i framtiden, så att rätt designkriterier väljs till respektive krets. En del av kokarkretsarna har mycket speciella krav på uppförande, så det går ej att välja en designstrategi, vilken passar alla kretsar. Dock borde ECA400-design passa flertalet.

Om auto-tuning utföres på flera olika kokerier, bör man få fram att exempelvis flisnivåer styrs bra med en designstrategi, vad beträffar val av amplitudmarginal ( $A_m$ ), fasmarginal ( $\varphi_m$ ) och kvoten integraldel/derivatadel ( $\alpha$ ). En annan typ av krets, exempelvis ångfastemp, får då kanske helt annan designstrategi, men lika på de olika kokerierna. Medan det stora flertalet kretsar klarar sig med normalstrategi.

Samma kretsspecifika erfarenheter bör komma fram vid val av olika hysteres ( $\epsilon$ ), reläutslag ( $d$ ) samt filterkonstant ( $T_f$ ).

## 7. Referenser

- Hägglund, T. (1988): "Adaptiv PID Control",  
ICHEME - Advances in Process Control II, Leeds, U.K.
- Hult, N. (1974): Sulfatkoning Y-203, Sveriges Skogsindustriförbund, Markaryd,  
Sweden.
- Åström, K.J. (1976): Reglerteori, Almqvist & Wiksell, Uppsala, Sweden.
- Åström, K.J. (1982): "Ziegler-Nichols Auto-Tuners", Report TRFT-3167, Dept of  
Automatic Control, Lunds Institut of Technology, Lund,  
Sweden.
- Åström, K.J. (1987): "Implementation of PID Regulators", Report TRFT 7344, Dept  
of Automatic Control, Lunds Institut of Technology, Lund,  
Sweden.
- Åström, K.J. and Hägglund T. (1984): "Automatic Tuning of Simple Regulators with  
Specifications on Phase and Amplitude Margins", Automatica  
20, 645—651.
- Åström, K.J. and Hägglund T. (1988): Automatic Tuning of PID Controllers,  
Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC ,  
USA.
- Åström, K.J. and Wittenmark, B. (1989): Adaptive Control, Addison-Wesley,  
Reading, Mass, USA.
- Kamyr Technology (1988), Kamyr AB, Karlstad, Sweden.
- Kamyr Digester Micro-Control Modules (1987), Kamyr AB, Karlstad, Sweden.
- Regulator ECA 40 Användarbeskrivning (1986), SattControl Instruments AB,  
Solna, Sweden.
- Regulator ECA 400 Användarbeskrivning (1988), SattControl Instruments AB,  
Solna, Sweden.