

ISSN 0280-5316
ISRN LUTFD2/TFRT--5586--SE

Förbättrad reglering av kvalitet på pappersmaskin

Oskar Nordin

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
October 1997

Department of Automatic Control Lund Institute of Technology Box 118 S-221 00 Lund Sweden	<i>Document name</i> MASTER THESIS	
	<i>Date of issue</i> October 1997	
	<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5586--SE	
<i>Author(s)</i> Oskar Nordin	<i>Supervisor</i> Karl Johan Åström and Börje Eriksson at MoDo Paper, Husum	
	<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Förbättrad reglering av kvalitet på pappersmaskin (Improved control of quality on a typical paper machine)		
<i>Abstract</i> <p>The quality requirements for paper manufacturing is increasing. Tolerances on important quality variables such as basis weight, moisture content and ash content are continuously being reduced. This leads to increasing demands on machine control. Poor control leads to lower production rate and rejection of finished paper. Properties of paper machines change due to renovation and improvements of the equipment that result in increased machine speed. Quality will not be maintained unless the control system is also modified and tuned. Improved tuning reduces quality variations and paper breaks. The purpose of this masters project was to explore what could be achieved by applying sound control engineering to a typical paper machine. The work was done on a paper machine at MoDo Paper in Husum. The study was focused on variations in basis weight, moisture and ash content. Variations in these variables were investigated by connecting special measurement equipment to the machine. Data logging, step response experiments and longer experiments with specially designed inputs were performed. Simple mathematical models were developed from the experimental data. Controllers were retuned based on the model and the variations obtained were measured and compared with the current fluctuations. The study showed that significant improvements could be made. Variations in moisture after the first dryer section and at the pope were reduced by 45% and 40% respectively. The numbers are given in terms of two standard deviations. Variations in basis weight and ash content were reduced by 23% and 69% respectively.</p>		
<i>Key words</i>		
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>		
<i>Supplementary bibliographical information</i>		
<i>ISSN and key title</i> 0280-5316		<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 83	<i>Recipient's notes</i>
<i>Security classification</i>		

The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through:
University Library 2, Box 3, S-221 00 Lund, Sweden
Fax +46 46 222 44 22 E-mail ub2@uub2.lu.se

Förord

Detta examensarbete är ett resultat av ett samarbete mellan institutionen för reglerteknik vid Lunds tekniska högskola och MoDo Paper i Husum. Några personer som har legat till grund för att examensarbetet gått att genomföra och i övrigt visat ett stort engagemang är främst Börje Eriksson och Peder Hägglund vid MoDo Paper i Husum. Till de riktas ett stort tack. Handledare professor Karl Johan Åström vid institutionen för reglerteknik vid Lunds tekniska högskola tillägnas även han ett speciellt tack för att i svåra situationer ha varit en ovärderlig länk mellan teori och tillämpning.

Lund i oktober 1997

Oskar Nordin

examensarbetare vid Lunds tekniska högskola

Sammanfattning

Kraven på papperstillverkare blir allt större i takt med att toleranserna på ytvikt, fukthalt och fyllmedelshalt krymper. Detta ställer högre krav på maskinstyrningen. Dålig styrning av en pappersmaskin kan leda till att maskinen inte når upp till full produktion samt att färdigtillverkat papper måste kasseras. Anledningar till att precisionen i maskinstyrning förändras kan bl.a. bero på ombyggnationer och successiva förbättringar som leder till ökad maskinhastighet i jakten på ökad produktion. Om man inte trimmar regulatorerna vid sådana typer av processförändringar leder detta till försämrad reglering. Bra reglering förkortar tiden efter avbrott vilket också är mycket lönsamt. Målet med detta arbete var att undersöka om kvaliteten vid papperstillverkning kunde förbättras genom trimning av regulatorer och mindre processförändringar. Arbetet utfördes på en av pappersmaskinerna vid MoDo Paper i Husum. Undersökningarna koncentrerades till variationerna i ytvikt, fukthalt och fyllmedelshalt. Variationer i dessa variabler undersöktes genom speciell utrustning som kopplades till processen. Stegvarsexperiment och långa experiment med speciella störtsignaler utfördes. Enkla matematiska modeller anpassades till mätdata och regulatorerna justerades. Den reglerprestanda som erhöles med nya data utvärderades. Det visade sig att stora förbättringar kunde erhållas. Variationerna i fukthalt efter förtork och eftertork uttryckt i två standardavvikelser reducerades med 45% resp. 40%. Variationerna i ytvikt och fyllmedelshalt uttryckt i två standardavvikelser reducerades med 23% resp. 69%.

Innehållsförteckning

ABSTRACT	1
FÖRORD.....	2
SAMMANFATTNING.....	3
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	4
1. INLEDNING	6
2. TEORI	8
2.1 PAPPERSMASKINEN.....	8
2.1.1 Korta cirkulationen.....	9
2.1.2 Virapartiet.....	15
2.1.3 Presspartiet.....	16
2.1.4 Torkpartiet.....	17
2.1.5 Upprullning.....	18
2.2 MATEMATISK MODELL	19
2.3 PARAMETERSKATTNING	19
2.5 LAMBDA-TUNING.....	22
2.6 MEASUREXREGULATORN	25
3. GENOMFÖRANDE.....	28
3.1 DATAINSAMLING	28
3.2 ANALYS AV KVALITÉTSSTORHETERNA.....	28
3.3 FUKTREGLERINGEN	30
3.4 TRYCKREGLERINGEN.....	33
3.5 KVALITÉTSLOOPARNA	37
3.5.1 Identifiering av processmodeller.....	37
3.5.2 Utförande.....	39
3.6 TUNING	49
3.7 ÅNGSYSTEMET	50
3.7.1 Struktur av ångtrycksnäten.....	51
3.7.2 Styrning av ångnäten.....	52
3.7.3 Brister i regleringen av ångnäten.....	52
3.7.4 Styrprogrammet.....	54
4. RESULTAT.....	55
4.1 TRYCKREGLERINGEN.....	56
4.2 KVALITÉTSLOOPARNA	59
5. UTVÄRDERING	64
5.1 UPPTÄCKTER	64
5.2 STÖRNINGAR	66
5.3 TRYCKGRUPPERNAS DYNAMIK	67
5.4 FÖRSLAG TILL FORTSÄTTNING	67

REFERENSER	69
BILAGA 1	71
BILAGA 2	76

1. INLEDNING

Presentation

MoDo Paper i Husum tillverkar finpapper, med ytvikter som varierar mellan 60-200 g/m². Fabriken har tre pappersmaskiner, PM6, PM7 samt PM8. På PM7 tillverkar man kopieringspapper och laserpapper, dvs. papper som skall passera genom kopiatorer och laserskrivare. Kvalitetskraven på den typen av papper är mycket hårda och leder därför till stora krav på bra maskinstyrning. PM7 tillverkar papper med ytvikter mellan 70-100 g/m². Större delen (80%) av produktionen utgörs av 80 grams kopieringspapper. Här kan exempelvis nämnas att fukten i papperet skall hålla 4.5% fukthalt vid maskinens slutända hädanefter kallad "Pope". Avviker fukthalten 0.3 procentenheter åt något håll anses papperet vara utanför kvalitetsgränsen och kasseras. Liknande gränser finns även för ytvikt och fyllmedelshalt.

Pappersbrott är en allvarlig störning som har många orsaker. Papperet går av och man måste trä om pappersbanan för att sedan starta regleringen igen. Efter avbrott kan det vara stora avvikelser på reglerstorheterna vilket innebär att man kasserar papper tills man har reglerat alla kvalitetsvariabler innanför tolleransgränserna. Med bra reglering kan man efter varje längre avbrott undvika att kassera tonvis med papper. Avbrott sker då och då. Vid normala fall någon eller flera gånger per dygn. Det är mycket lönsamt att minska tiden för återgång till normal drift.

Pappersmaskinen PM7 konstruerades ursprungligen för en maskinhastighet på ca 500 m/min. Med åren har hastigheten successivt ökat till att idag ligga kring 900 m/min. Eftersom de processer som skall regleras innehåller långa dödtider och blandningsprocesser är det troligt att processmodellerna beror av maskinhastigheten.

Syfte

Styrsystemet för regleringen av PM7 byttes under hösten 1996. Systemet beräknar själv reglerparametrar utifrån angiven processmodell och önskemål om snabbhet. När man talar om styrning av en pappersmaskin är det i huvudsak två typer av regleringar, tvärsreglering och längsreglering. Tvärsregleringen skall se till att hålla en jämn profil över hela banbredden. Längsregleringen som detta examensarbete omfattar går ut på att styra ventilerna för mäldflöde och fyllmedelsflöde för att erhålla önskad ytvikt och fyllmedelshalt i papperet. Till längsregleringen hör också att styra trycken i torkpartierna för att hålla rätt fukthalt i papperet. Syftet med examensarbetet var först och främst att bestämma aktuella modeller för ytvikt, fyllmedelshalt, förtork och eftertork samt att under arbetets gång även vara observant på andra faktorer som kunde orsaka problem vid längsregleringen av PM7.

I Husum arbetar man intensivt med att införa en metod för inställning av regulatorer som kallas lambdatuning. Denna metod gör det möjligt att ställa in PI-regulatorer för enkla processmodeller med enkla medel och tumregler. Metoden tillämpas av Measurex's system och var därmed enda möjligheten vid inställning av styrsystemet.

Avgränsning

Examensarbetet begränsades till att undersöka den papperskvalité som representerar 80% av produktionen. Alla tester för skattning av modellparametrarna utfördes på 80 grams kvalitéer med en fyllmedelshalt av 21-22 %.

Rapportens disposition

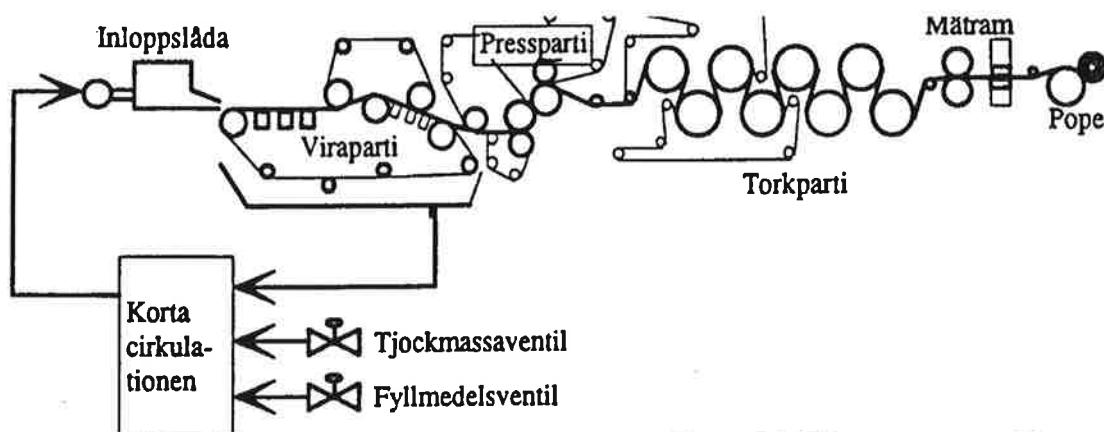
Den här rapporten undersöker möjligheterna till förbättrad reglering av kvalitetsmåttan ytvikt, fukthalt och fyllmedelshalt. I kapitel 2 förklaras teorin bakom pappersmaskinen med de olika sektionerna och en översikt av de teoretiskt matematiska modeller som beskriver maskinen. Beskrivning av regulatorn för regleringen av kvalitetsmåttan och en enkel metod för att ställa in regulatorparametrarna behandlas. Kapitel 3 tar upp lokalisering av de specifika problemen och utförandet av alla försök för skattning av processmodellerna. Resultaten presenteras i kapitel 4 där spridningsmått på kvalitetsmåttan före och efter examensarbetet läggs fram. Kapitel 5 behandlar utvärdering av examensarbetet. Här presenteras betydelsen av störningars frekvens och slutsatser på vad regleringen klarar. Förslag på fortsatt arbete för möjligheter till ytterligare förbättringar behandlas som sista punkt.

2. TEORI

2.1 Pappersmaskinen

Mäld kallas den slutliga massan vid tillverkning av papper. Mälden består först bara av råvarorna cellulosafiber och vatten. Dessa blandas sedan med massa av malt kasserat papper sk utskott för att slutligen blandas med olika kemikalier. Mälden reds och späds med bakvatten. Bakvatten är det som rinner igenom i virapartiet.

Mälden eller tjockmassamäld som det kallas i detta skede består då av ca 3% fiber. Tjockmassan späds sedan ytterligare med bakvatten och fyllmedel tillsätts. Den slutliga mixen består bara till 0.5% av fiber. Mixen förfinas i den korta cirkulationen med silar och avluftningssystem innan den till slut med hjälp av inloppslådan sprids i ett jämt fördelat flöde över virapartiets bredd. Här avvattnas mixen och papperets fiberriktning och struktur bestäms. Vattnet tillsammans med fiber och fyllmedel som faller genom virapartiet återcirkuleras och återanvänds. Pappersbanan behöver sedan torkas vilket först sker i presspartiet för att sedan med större precision torkas med ångfyllda cylindrar. Innan papperet rullas upp på en tambour mäts papperets egenskaper av ett traverserande mät huvud. I Figur 1.1 ges en överblick av pappersmaskinen efter massaberedningen.

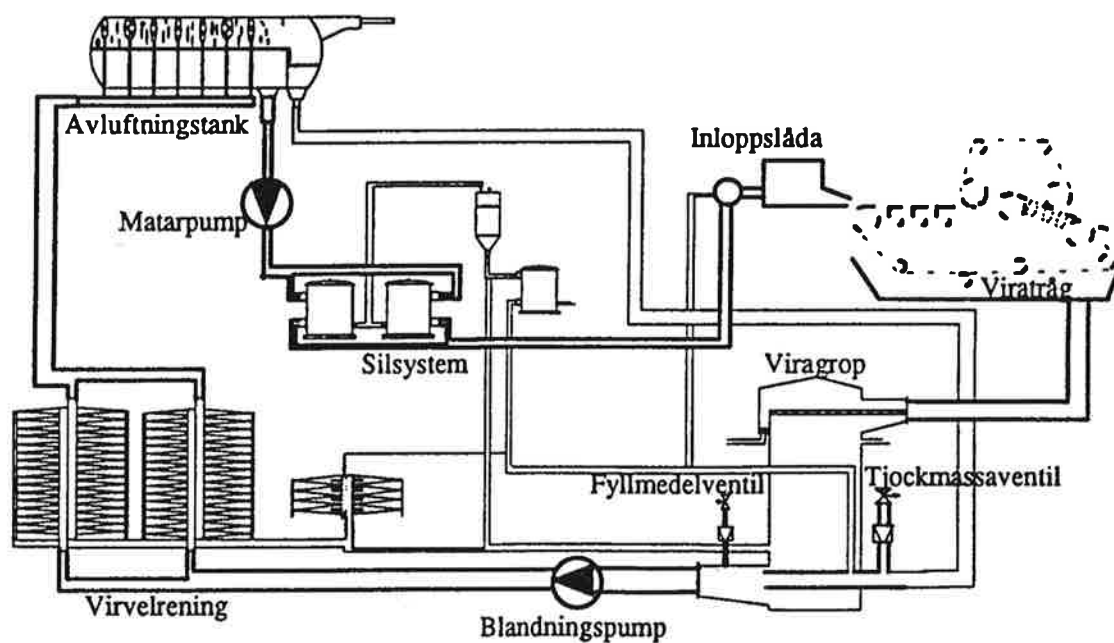


Figur 1.1 Pappersmaskinen med dess olika sektioner. I längsriktningen först den korta cirkulationen följt av inloppslåda, viraparti, pressparti, torkparti och till sist mätning och upprullning vid pope. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

PM7 har till skillnad från figur 1.1 två torkpartier p.g.a. ett limpålägg.

2.1.1 Korta cirkulationen

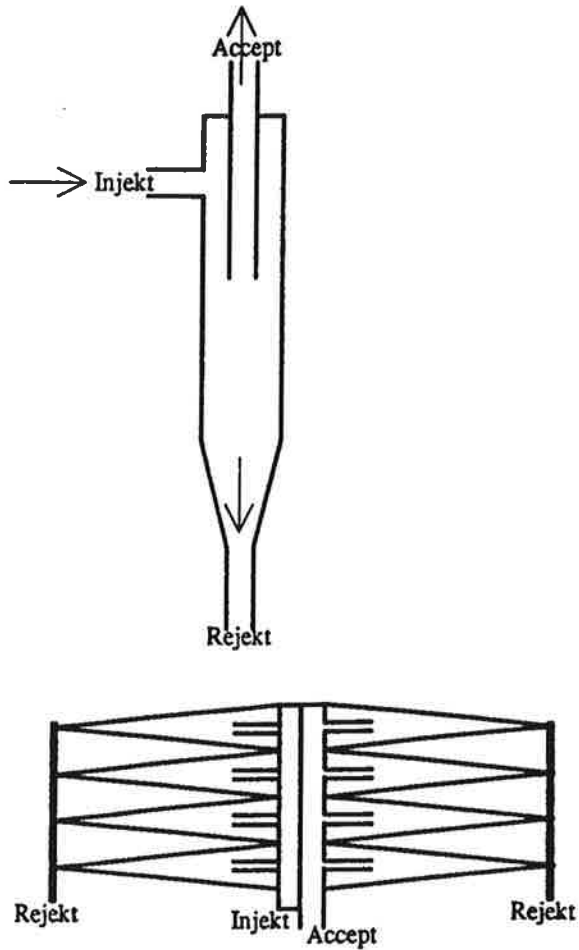
För att ge papperet så fina egenskaper som möjligt och för att underlätta maskinstyrningen genomgår malden ett flertal förädlingssteg. Malden skall i huvudsak spädas från ca 3% fiberinnehåll till ca 0.5% samt tillsättas fyllmedel och andra kemikalier. Dessutom renas mixen genom olika silsystem och avluftas för önskad karaktär. Detta benämns med ett ord som den korta cirkulationen och visas i Figur 1.2.



Figur 1.2 Maskinens återcirkulation med den korta cirkulationen märkt med grova linjer.
(Kopierat från Dahlberg, 1993)

Virvelrenaren

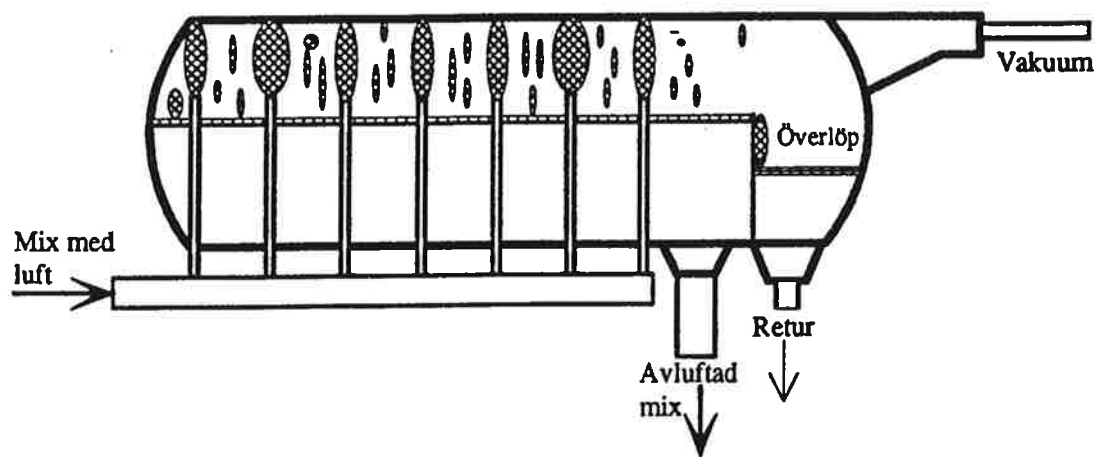
Virvelrenaren, Figur 1.3 separerar icke önskvärd materia från mälden genom kännedom om densiteter och tillämpar centrifugering i flera parallella steg för att utföra rensningen.



Figur 1.3 I virvelrenaren slungas material med högre densitet exempelvis barkprodukter ut mot väggarna och åker ut genom rejekthålet. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Avluftningstank

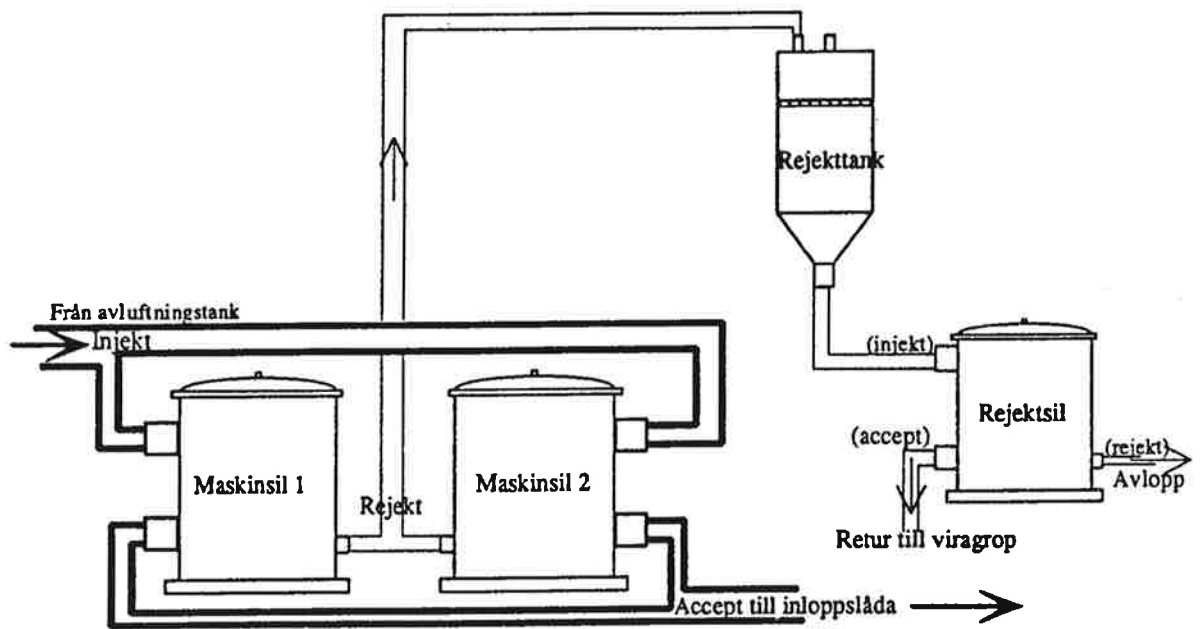
För att inloppslådan skall kunna leverera en homogen stråle ut på virapartiet får inte mixen innehålla luftbubblor. De resulterar då i ett ojämnt fiberflöde. Avluftningstanken Figur 1.4 även kallad dekulator avlägsnar luft genom att mixen sprutas genom tunna munstycken in i ett vakuumbärl så att luften men inte fiber och vatten transporteras ut.



Figur 1.4 För att rensa mäldmixen från luftbubblor vilket stör produktionen passerar mixen genom dekulatorn där tunna munstycken separerar luftbubblorna från mixen. Luften fraktas bort av vakuumbärl medan vätskan stannar kvar. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Silsystemet

Silsystemet, Figur 1.5 skall se till att avlägsna klumpar av fiber eller annat som kan orsaka ojämnheter i papperet, problem under produktion eller avbrott på maskinen. Systemet består av parallella maskinsilar där acceptet går till inloppslådan medan rejektet silas en gång till i rejektsilen där acceptet går till viragropen.

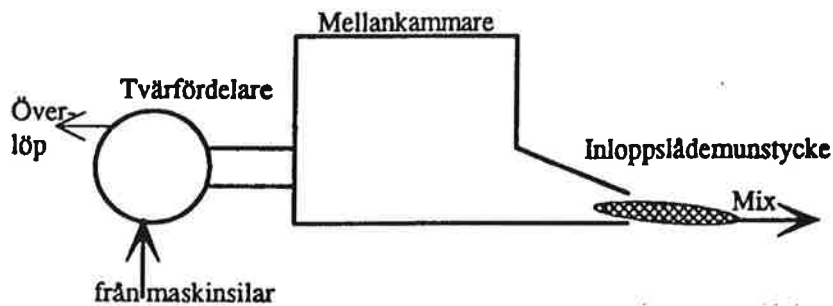


Figur 1.5 Silsystemet här bestående av två maskinsilar en rejektsil och en rejekttank som buffert till rejektsilen. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Inloppslådan

Det är inloppslådan, Figur 1.6 som skall fördela mäldmixen som kommer i en rörledning till att fördela sig jämnt över hela pappersmaskinens bredd. Strålen skall med andra ord vara 6-7 meter bred och 10-20 mm hög, med samma flödes hastighet och riktning över hela tvärsprofilen.

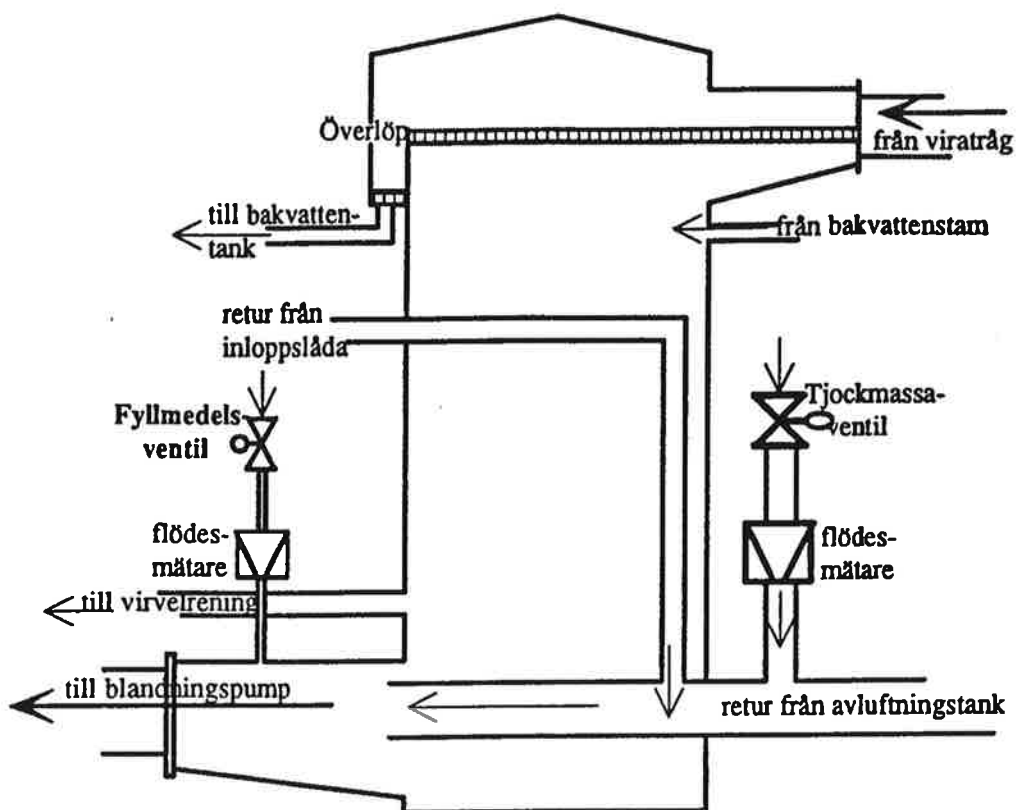
För att åstadkomma ett jämnt flöde tvärs trycksätts mixen i tvärfördelaren där flödet fördelas. I mellankammaren jämnas eventuella flödes hastigheter över profilen ut till att hålla samma hastighet när flödet når inloppslådemunstycket. Där formas den slutliga strålen.



Figur 1.6 Inloppslådan som till huvudsak består av tvärfördelare, mellankammare och inloppslådemunstycke. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Viragropen

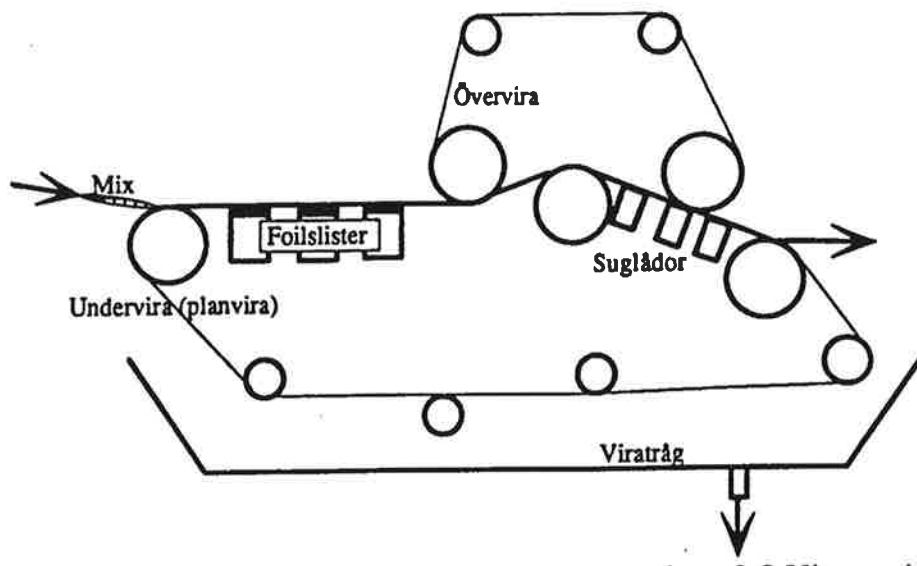
I viragropen, Figur 1.7 samlas det mesta av bakvattnet från virapartiet. Volymen i viragropen hålls alltid konstant. Bakvattnet innehåller en viss mängd fiber och fyllmedel, koncentrationen beror av vilken retention som råder. Bakvattnet används till spädningar på olika håll i återcirkulationen. Dess främsta uppgift är att späda tjockmassan till en för pappersmaskinen lämplig koncentration. Observera att volymen i viragropen ger upphov till en tröghet vid koncentrationsändringar i fiber och fyllmedel vilket framförallt syns vid ändringar av tjockmassa- eller fyllmedelsflöde.



Figur 1.7 I viragropen samlas vatten och allt som åker igenom viran samt returerna från inloppslådan och återcirkulationen. I botten av viragropen tillsätts den nya tjockmassan och fyllmedel. Tjockmassan späds här till en lagom koncentration för maskinen. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

2.1.2 Virapartiet

När alla kemikalier i massflödet har blandats och nått inloppslådan sprutas det ut på virapartiet, Figur 1.8. Det är här som papperet formas. Fiberriktningen och därmed papperets struktur avgörs av viran och hastighetsskillnaden mellan flödet från inloppslådan och virans hastighet i längsriktningen. Vira kallas det myggnätsliknande nät som skall förhindra allt för stora förluster av fiber, fyllmedel och andra kemikalier när de passerar vakuumsuglådorna där det mesta av vattnet avlägsnas. Måttet på hur mycket av de fiber och fyllmedel som blir kvar efter virapartiet heter retention och anges i % av inkommande mängd. Vakuumlådorna sitter alldeles under viran och suger ner vattnet och lämnar tack vare viran kvar merparten av fiber och fyllmedel. Vakuumtrycket i lådorna ökar successivt i maskinens längsriktning i takt med att fukthalten i smeten minskar.

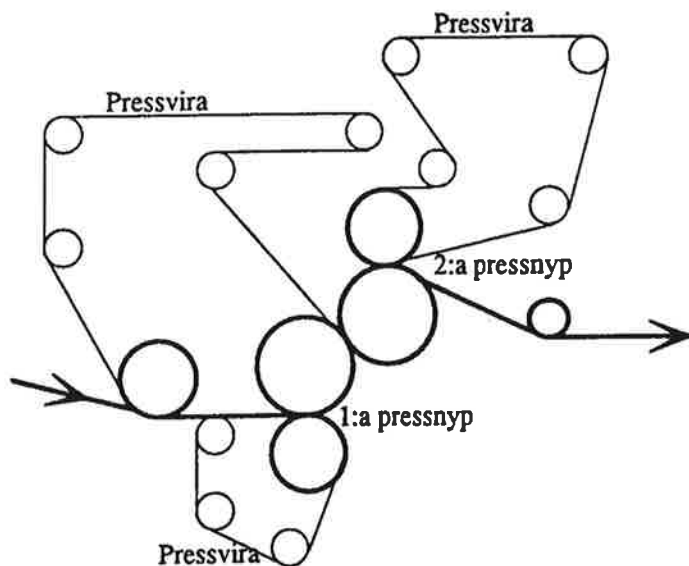


Figur 1.8 På virapartiet formas papperets struktur, det mesta av vattnet avlägsnas och en viss del av fiber och fyllmedel följer med igenom viraduken ned i viratråget. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Hur stor del av de fibrer och fyllmedelspartiklar som sprutas ut på viran, som följer med papperet bestäms av retentionen. Retentionen skiljer sig för fiber och fyllmedel. Eftersom fibrer är större partiklar än fyllmedlet har fiber en högre retention, ca 98% jämfört med fyllmedel, ca 50%. För att öka retentionen, främst på fyllmedlet finns på PM7 en retentionsmedelstyrning. Retentionsmedlet fungerar som ett klister och binder fyllmedlet till fibrerna och ökar på så sätt retentionen.

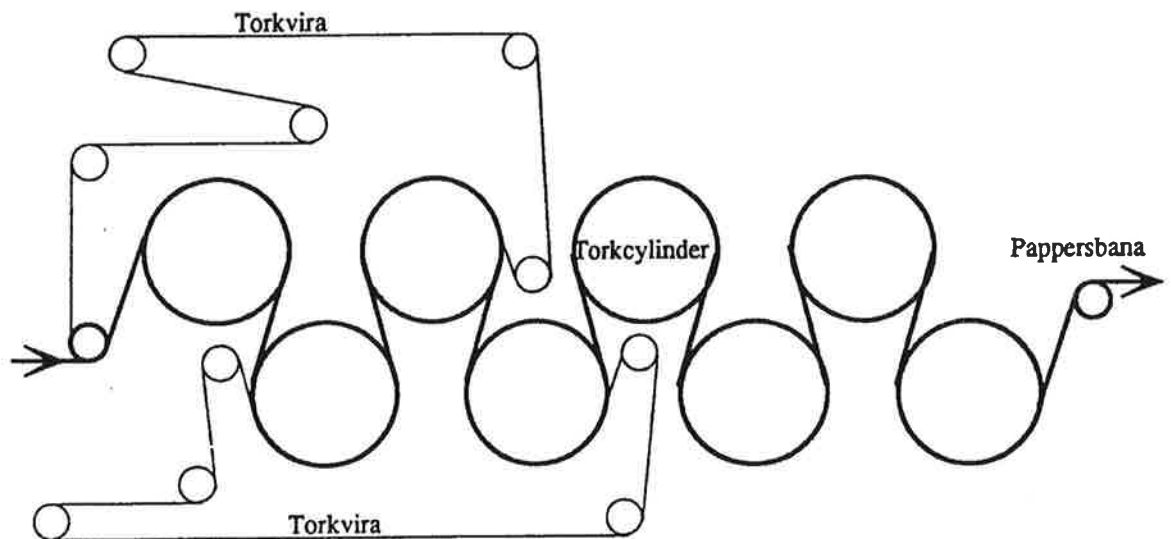
2.1.3 Pressparti

Att torka med hjälp av ånga är kostsamt, därför finns ett pressparti, Figur 1.9 innan torkpartiet som pressar ur vattnet så att torkpartiet inte skall behöva vara så långt. Det blöta papperet pressas mellan valsar med så kallade pressfiltar på var sida om papperet. Filtarna stabiliserar pappersbanan och drar åt sig vattnet som sedan torkas med vakuum.



Figur 1.9 För att torka pappersbanan ytterligare pressas den mellan filter och valsar vilket reducerar fukthalten till en lagom nivå att klara av i torkpartiet. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

2.1.4 Torkpartiet



Figur 1.10 I torkpartiet värms papperet genom ångfyllda torkcylindrar och torkas till önskvärd fukthalt genom tryckreglering av cylindrarna. (Kopierat från Dahlberg, 1993)

Torkpartiet, Figur 1.10 består av ångtrycksreglerade sk torkcylindrar, dessa har som funktion att torka det inkommande blöta papperet till en slutlig fukthalt omkring 5%. Torkpartiet är uppdelat i två huvudsektioner, förtork och eftertork. Förtorken före limpressen och eftertorken efter. Dessa består i sin tur av ett par separata grupper med individuella ångtryck.

Förtorken

Förtorken består av 4 grupper, där grupp 1 är den första i längsriktningen. För att torka papperet så effektivt som möjligt ökar man stegvis ångtrycket och därmed temperaturen på torkcylindrarna för varje grupp utefter pappersbanan. Torkar man för hårt bildas ett luftlager mellan cylindrarna och papperet sk ångpäls vilket i sin tur leder till sämre torkeffekt. Vid drift uppdateras nytt börvärde till grupp 4 medan grupp 3 tilldelas ett börvärde via en skalfaktor eller en viss tryckdifferens i förhållande till grupp 4. Grupp 1 och 2 har fasta börvärden och påverkas ej av fuktregulatorn. Vid förtorkens slut bör papperet ha en fukthalt kring 3% vilket är torrare än vad som är papperets önskade slutliga fukthalt. Förtorken har med anledning av regleringen av fukthalten en mätram innan limpressen. Limpressramens enda uppgift är att mäta fukthalten.

Limpressen

För att papperet ska bli mindre vattenkänsligt och styvare lägger man på en viss mängd lim. Limmet är en typ av stärkelse baserad på majs eller potatismjöl. Detta pålägg sker mellan förtorken och eftertorken i något som kallas för limpress. Limpressen består på

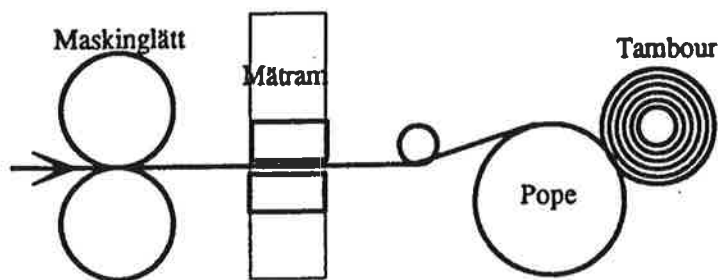
PM7 av två valsar mellan vilka papperet löper. Valsarna förses kontinuerligt med en tunn hinna lim som trycks in i papperet på båda sidor när det passerar. Papperets förmåga att ta till sig limmet beror bl. a. av fukthalten. En varierande fukthalt vid limpressen får till följd att ytlimspålägget också varierar. En bra reglering av fukthalten vid limpress är därför väsentlig för ett jämnt pålägg av ytlimmet.

Eftertorken

Efter limpressen är nu papperet fuktigt igen, både på grund av vatten och fukten av limmet. Därför torkas det igen i eftertorken. Här återfinns tre grupper, grupp 5, grupp 6:övre och grupp 6:undre. Grupp 5 är ett försiktigt första steg i eftertorken medan grupp 6 står för största delen av torkandet. Denna är också uppdelad i två separata grupper men här ligger grupperna ”i varandra” men med olika ångtryck. Varannan cylinder i papperets längsriktning hör till övre resp undre grupp 6. Anledningen till detta är att man genom att torka försiktigare på ena sidan papperet kan undvika vridningar (curl) i papperet vilket annars uppstår om man värmer lika mycket på båda sidor. På liknande sätt som i förtorken styr därför fuktregulatorn bara på en av grupperna medan den andra får sitt börvärde som ett kompenserat värde utifrån en tryckdifferens.

2.1.5 Upprullning

Efter torkpartiet passerar papperet mellan två valsar som roterar med lägre hastighet än maskinhastigheten. Papperets yta får då en slätare struktur. Därefter sitter mätramen med ett traverserande mät huvud. Mät huvudet avläser en mängd egenskaper hos papperet, men för längsregleringen är det främst ytvikt, fukthalt och fyllmedelshalt som är av intresse. Sist på maskinen sitter själva upprullningen där papperet samlas på en tambour se Figur 1.11.



Figur 1.11 Ändstycke i maskinens längsriktning med maskinglätt, mätram och upprullning.
(Kopierat från Dahlberg, 1993)

2.2 Matematisk modell

Den matematiska modellen för pappersmaskinen är väldigt komplex om hänsyn tas till alla återcirkulationer av fiber och fyllmedel. En förenklad modell av ytviktens och fyllmedelhaltens beteende som funktion av mäldflöde och fyllmedelsflöde, kan oftast beskrivas som första ordningens processer med inbördes korskopplingar och dödtider. Dödtiderna är enkla att motivera. Det beror helt enkelt på flödets transporttider i rör och papperets färd genom maskinen. Anledningen till uppkomst av första ordningens processer har att göra med koncentrationsutjämnningar i inloppslådan samt återcirkulation av ytterligare koncentrationsutjämnningar i viragropen. För motivering genom massbalanskvationer se bilaga 1.

2.3 Parameterskattning

MK-skattning

En linjär matematisk modell kan beskrivas enligt ekvation (2.1).

$$y(i) = \varphi_1(i)\theta_1^0 + \varphi_2(i)\theta_2^0 + \dots + \varphi_n(i)\theta_n^0 = \varphi^T(i)\theta^0 \quad (2.1)$$

Där y står för den observerade variabeln, i står för diskreta tidpunkter, φ är observerade signaler, externa eller tidigare versioner av variabeln y samt θ som är den matematiska modellens parametrar. Mer kompakt skrivet är

$$\begin{aligned} \varphi^T(i) &= (\varphi_1(i) \ \varphi_2(i) \ \dots \ \varphi_n(i)) \\ \theta^0 &= (\theta_1^0 \ \theta_2^0 \ \dots \ \theta_n^0)^T \end{aligned}$$

MK-skattningen (Minsta Kvadrat) går ut på att anpassa modellparametrarna så att modellen beter sig så likt verkligheten, dvs försökens loggade data som möjligt. Detta fås om man minimerar förlustfunktionen

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t (y(i) - \varphi^T(i)\theta)^2 \quad (2.2)$$

med avseende på θ . Om skillnaden mellan verkligheten och modellen skrivs som

$$\varepsilon(i) = y(i) - \varphi^T(i)\theta$$

och

$$Y(t) = (y(1) \ y(2) \ \dots \ y(t))$$

$$\phi(t) = \begin{pmatrix} \phi^T(1) \\ \vdots \\ \phi^T(t) \end{pmatrix}$$

kan förlustfunktionen skrivas som

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \varepsilon^2(i) = \frac{1}{2} E^T E = \frac{1}{2} \|E\|^2$$

där

$$E = Y - \phi\theta.$$

Då kan förlustfunktionen skrivas om på formen

$$2V(\theta, t) = E^T E = (Y - \phi\theta)^T (Y - \phi\theta). \quad (2.3)$$

Minimeras funktionen med avseende på θ blir θ -vektorn

$$\theta = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y. \quad (2.4)$$

ML-skattning

För modeller med brusmodeller mer komplicerade än bara vitt brus kan inte MK-skattning användas för framtagandet av modellparametrarna. I de fallen används ML-skattning (*Maximum Likelihood*). Metoden är till viss mån approximativ och är komplicerad p.g.a. numeriska svårigheter. Generellt förutsätts att bruskillan $e(t)$ till den dynamiska modellen är normalfördelat vitt brus.

För härledningen utgår vi från modellen

$$Y(t) = - \sum_{j=1}^p a_j Y(t-j) + \sum_{j=1}^{m_1} b_{1j} u_1(t-j) + \dots + \sum_{j=1}^{m_k} b_{kj} u_k(t-j) + d_1 f_1(t) + \dots + d_m f_m(t) + \sum_{j=0}^q c_j e(t-j) \quad (2.5)$$

Likt MK-skattningen ligger alla parametrarna enligt

$$\theta^T = (a_1 \dots a_p, b_{11} \dots b_{1m_1}, b_{21} \dots b_{km_k}, d_1 \dots d_m, c_1 \dots c_q).$$

I ekvation (2.5) betraktas $Y(t)$ och $u(s)$ som stokastiska variabler, därför kan likelihoodfunktionen skrivas som

$$\begin{aligned}
L(\theta, \sigma^2) &= f_{Y_N \dots Y_1}(y_N, \dots, y_1; \theta, \sigma^2) = \dots = \\
&= \left[\prod_{t=n+1}^N f_{Y_t|Y_{t-1}}(y_t; \theta, \sigma^2) \right] f_{Y_n}(y_n, \dots, y_1; \theta, \sigma^2)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

där $y_t | y_{t-1}$ betyder ettstegsprediktorn. Om vi sedan antar att prediktionen har kommit i ett stationärt tillstånd vilket blir fallet med oändligt många observerade data så gäller för $t > n$ att

$$\begin{aligned}
E(Y_t | Y_{t-1}; \theta, \sigma^2) &= - \sum_{j=1}^p a_j Y(t-j) + \sum_{j=1}^{m_1} b_{1j} u_1(t-j) + \dots + \\
&+ d_1 f_1(t) + \dots + \sum_{j=1}^q c_j e(t-j)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

med prediktionsfelet

$$\varepsilon(t, \theta) = Y_t - E(Y_t | Y_{t-1}; \theta) \tag{2.8}$$

och dess varians $V(\varepsilon(t, \theta)) = \sigma^2$. För $t > n$ gäller då

$$\begin{aligned}
f_{Y_t|Y_{t-1}}(y_t, \theta, \sigma^2) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(y_t - E(Y_t|Y_{t-1}; \theta))/2\sigma^2} = \\
&= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\varepsilon^2(t, \theta)/2\sigma^2} .
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Den högra faktorn i ekvation (2.6) är tydligt krångligare att bestämma. Logaritmerar man hela ekvation (2.6) får man

$$\begin{aligned}
\log L(\theta, \sigma^2) &= -\frac{1}{2}(N-n)\log(2\pi) - \frac{1}{2}(N-n)\log(\sigma^2) \\
&- \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{t=n+1}^N \varepsilon^2(t, \theta) + \log(f_{y_n}(y_n, \dots, y_1; \theta, \sigma^2))
\end{aligned} \tag{2.10}$$

vilken kan förenklas genom att se den högra termen som en konstant faktor vilken då blir ointressant inför maximeringen av uttrycket. Det mest intressanta för att maximera (2.10) blir då att minimera

$$Q(\theta) = \sum_{t=n+1}^N \varepsilon^2(t, \theta) . \tag{2.11}$$

Med villkoret att $\frac{\partial \log L}{\partial (\sigma^2)} = 0$ riktas maximeringen till att bero av modellparametrarna.

Efter numerisk lösning ger detta även slutliga skattningen av $V(\varepsilon(t, \theta)) = \sigma^2$

$$-\frac{N-n}{2\sigma^2} + \frac{1}{2\sigma^4} Q(\theta) = 0,$$

dvs

$$\sigma^2 = \frac{Q(\theta)}{N-n}.$$

Residualerna genereras och uppdateras rekursivt som

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \theta) = & - \sum_{j=1}^q c_j \varepsilon(t-j, \theta) + \sum_{j=0}^p a_j y(t-j) - \\ & - \sum_{j=1}^{m_1} b_{1j} u_1(t-j) - \dots - \sum_{j=1}^{m_k} b_{kj} u_k(t-j) - \\ & - d_1 f_1(t) - \dots - d_m f_m(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.5 Lambda-tuning

På en stor fabrik som MoDo Paper i Husum, har man tusentals regulatorer i drift och bara ett fåtal ingenjörer eller tekniker som har kunskapen att ställa in regulatorerna. Avsikten med att införa lambdatuningsmetoden är att fler ska behärska och förstå val av reglerparametrar samt att i viss mån även kunna utföra tuning på egen hand. Metoden resulterar dessutom i väldigt stabila reglersystem.

Lambda-tuning är en polplaceringsmetod som bygger på approximationer. Idén kommer ursprungligen ifrån Dahlin (1968) och Higham (1968) som använde denna metod för att ställa in digitala regulatorer specialiserade på processer med dödtid. Tanken med Lambdatuning är att konstruera den slutna loopens överföringsfunktion så att den svarar som ett första ordningens system. Tidskonstanten för det önskade slutna systemet är den enda designparametern och bestämmer snabbheten på systemet. Denna placeras i $s = -\lambda$. Därav namnet.

Metoden är tänkt att tillämpas på första ordningens processer med eller utan dödtid återkopplat med en PI-regulator. Med kännedom om tidskonstanten för det slutna systemet kan man enkelt svara på insvängningstider och hålla isär reglerloopar som påverkar varandra.

Modell

Metoden är i första hand tänkt att användas på processer av första ordningen, bestående av de tre parametrarna: statiska förstärkningen K_p , tidskonstanten T samt en eventuell tidsfördröjning L .

$$G(s) = K_p \frac{e^{-sL}}{1+sT} \quad (2.13)$$

Processer med integrerande karaktär som modellen med två parametrar bestående av integrationskonstanten K_v och dödtid L kan också hanteras. Även kombinationer av dessa typer av grundmodeller går att reglera utifrån resonemanget kring lambdatuning.

$$G(s) = K_v \frac{e^{-sL}}{s} \quad (2.14)$$

Dessa typer av processer är väldigt frekventa inom processindustrin och lätta att identifiera vilket gör metoden extra intressant.

Lambdametoden

Metoden går ut på att återskapa ett slutet system med karaktären av ett första ordningens system med dödtid.

$$G_{cl}(s) = \frac{e^{-sL}}{1+sT_{cl}} \quad (2.15)$$

Nedan följer härledningen av fallet med en första ordningens process med dödtid som återkopplas med en vanlig PI-regulator.

$$G_R(s) = K \frac{1+sT_i}{sT_i} \quad (2.16)$$

Där K står för regulatorförstärkningen och T_i är integrationstiden. Det återkopplade systemet får således följande överföringsfunktion

$$G_{cl} = \frac{GG_R}{1+GG_R} = \frac{KK_p(1+sT_i)e^{-sL}}{(1+sT)sT_i + KK_p(1+sT_i)e^{-sL}} \quad (2.17)$$

Genom att approximera e^{-sL} i nämnaren med $1-sL$ kan G_{cl} skrivas som

$$G_{cl} \approx \frac{KK_p(1+sT_i)e^{-sL}}{(1+sT)sT_i + KK_p(1+sT_i)(1-sL)}$$

Genom att sedan välja $T_i = T$ förkortar man processens pol och med regulatorns nollställe och får

$$G_{cl} \approx KK_p \frac{e^{-sL}}{KK_p + s(T - KK_p L)} \quad (2.18)$$

Efter approximationen och pol- nollställesförkortningen kan nu polplacering tillämpas för att erhålla det önskade slutna systemet. Det slutna systemets karaktäristiska ekvation är

$$s\left(\frac{T}{KK_p} - L\right) + 1 = 0,$$

Vilket skall motsvara

$$sT_{cl} + 1 = 0,$$

där T_{cl} står för det slutna systemets önskade tidskonstant. Identifiering av koefficienterna ger följande regulatorparametrar:

$$K = \frac{1}{K_p} \frac{T}{(L + T_{cl})}, \quad (2.19)$$

$$T_i = T. \quad (2.20)$$

Designparametern

T_{cl} , den slutna loopens tidskonstant är den enda designparametern och avgör därmed hela systemets karaktär. Friheten att dimensionera det slutna systemet är dock av naturliga skäl begränsade. T_{cl} kan givetvis inte väljas godtyckligt. Valet av tidskonstant för det slutna systemet måste relateras till processens frekvensegenskaper för att inte leda till instabilitet eller dålig prestanda. Kontroll av vettig designparameter kan alltid verifieras genom att undersöka om det slutna systemet beter sig som önskat genom exempelvis stegsvar.

Ett första ordningens system beter sig bara som modellen beskriver inom begränsade frekvenser. Det slutna systemets tidskonstant bör därför relateras till processens dynamik. I fallet första ordningens system med dödtid är det därför mest intressant med frekvenser nära systemets brytfrekvens, $1/T$ eller frekvenser relaterat till dödtiden L .

Integrerande processer kan asymptotiskt beskrivas som ett första ordningens system med oändlig förstärkning K_p och oändlig tidskonstant T . För att få tillräckligt snabb respons på sådana system relaterar man T_{cl} på annat sätt se [1].

Generellt gäller att T_{cl} bör väljas liten om snabba system eftersträvas. Både vad gäller att följa börvärden och att kompensera för störningar. Ett större värde på T_{cl} innebär å andra sidan en större tolerans för processvariationer alternativt osäkerhet i processkänedom.

Valet av tidskonstanten T_{cl} brukar oftast beräknas som en produkt av processens tidskonstant och faktorn λ , enligt $T_{cl} = \lambda T$, om processen beskrivs av en första ordningens modell och $L < T$. Är processens dödtid L större än dess tidskonstant T , bör T_{cl} beräknas som λL istället. Beroende på hur bra kännedom man har om processen och hur snabb man vill designa systemet bör man välja sitt λ omkring 0.5-3.0.

Eftersom lambdametoden är en approximativ metod stämmer inte alltid det slutna systemets tidskonstant med det önskade. Generellt kan sägas att det relativa felet hos tidskonstanten ökar med ökat λ . För utförligare motiveringar och fördjupningar i lambdametoden se [1].

2.6 Measurexregulatorn

Measurex regulator är en typ av Dahlinregulator (Dahlin E B [3], [4] och Åström K J ,Hägglund T, sid 157 [2]). I diskret form ges regulatorn av

$$\Delta u(k) = -K_u[\Delta u(k-1) + \Delta u(k-2) + \dots + \Delta u(k-d)] + K_e[e(k) - F_p e(k-1)], \quad (2.21)$$

där

$$K_u = (1 - e^{-T_s/\alpha}),$$

$$K_e = \frac{K_u}{G_c K_p (1 - F_p)},$$

$$d = \text{integer}\left(\frac{T_d}{T_s}\right),$$

$$F_p = e^{-T_s/T_p}.$$

Där

α = den önskade tidskonstanten för det slutna systemet,

T_s = samplingstiden,

T_d = processens dödtid i sekunder,

T_p = processens tidskonstant,

K_p = processens statiska förstärkning,

G_c = korrektionsterm för processförstärkning vid hastighetsändringar på maskinen.

$$\Delta u(k) = -K_u \sum_{i=1}^d \Delta u(k-i) + K_e F_p [e(k) - e(k-1)] + K_e [1 - F_p] e(k-1) \quad (2.22)$$

Jämför dödtidskompenserad PI-regulator [2]

Measurex regulator på Z-transform

Z-transformerad blir styrlagen

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= -K_u \Delta u(k) \sum_{i=1}^d z^{-i} + K_e F_p [1 - z^{-1}] e(k) + K_e [1 - F_p] e(k) \\ &= -K_u \frac{z^{-1}(z^{-d} - 1)}{z^{-1} - 1} \Delta u(k) + K_e F_p [1 - z^{-1}] e(k) + K_e [1 - F_p] e(k) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Transformerad till normal form genom

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (2.24)$$

$$u(k) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \Delta u(k) \quad (2.25)$$

blir

$$u(k) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot \left[-K_u \cdot \frac{z^{-1}(z^{-d} - 1)}{z^{-1} - 1} \cdot \Delta u(k) + K_e \cdot F_p \cdot [1 - z^{-1}] \cdot e(k) + K_e \cdot [1 - F_p] \cdot e(k) \right] \quad (2.26)$$

Regulatorns styrlag uttryckt på Z-transform kan jämföras med en PI-regulator med dödtidskompensering om den skrivs på formen

$$U(z) = -K_u \cdot \frac{z^{-1}(z^{-d} - 1)}{-1 + 2z^{-1} - z^{-2}} \cdot U(z) + K_e \cdot F_p \cdot E(z) + K_e \cdot \frac{(1 - F_p)}{1 - z^{-1}} \cdot E(z), \quad (2.27)$$

$U(z)$ = Dödtidskompensering + Proportionaldel + Integrationsdel.

Detta är en PI-regulator med dödtidskompensering [2].

Härledning av regulatorns överföringsfunktion

Ekvation (2.23) kan skrivas på formen

$$\Delta u(k) \left[1 + \frac{K_u \cdot z^{-1}(z^{-d} - 1)}{z^{-1} - 1} \right] = K_e \cdot F_p \cdot [1 - z^{-1}] \cdot e(k) + K_e \cdot [1 - F_p] \cdot e(k)$$

eller

$$\Delta u(k) \left[1 + \frac{K_u \cdot z^{-1}(z^{-d} - 1)}{z^{-1} - 1} \right] = K_e \cdot [1 - F_p z^{-1}] \cdot e(k), \quad (2.28)$$

Summerad enligt formel (2.24) fås

$$U(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot \frac{K_e \cdot (1 - F_p z^{-1})(z^{-1} - 1)}{(K_u \cdot z^{-(d+1)} + z^{-1} - (1 + K_u))} \cdot E(z), \quad (2.29)$$

vilket ger regulatorn den slutliga överföringsfunktionen

$$G_R(z) = \frac{K_e \cdot [-z^{d+2} + (1 + F_p)z^{d+1} - F_p z^d]}{[-(1 + K_u)z^{d+2} + (2 + K_u)z^{d+1} - z^d + K_u z - K_u]}, \quad (2.30)$$

3. GENOMFÖRANDE

3.1 Datainsamling

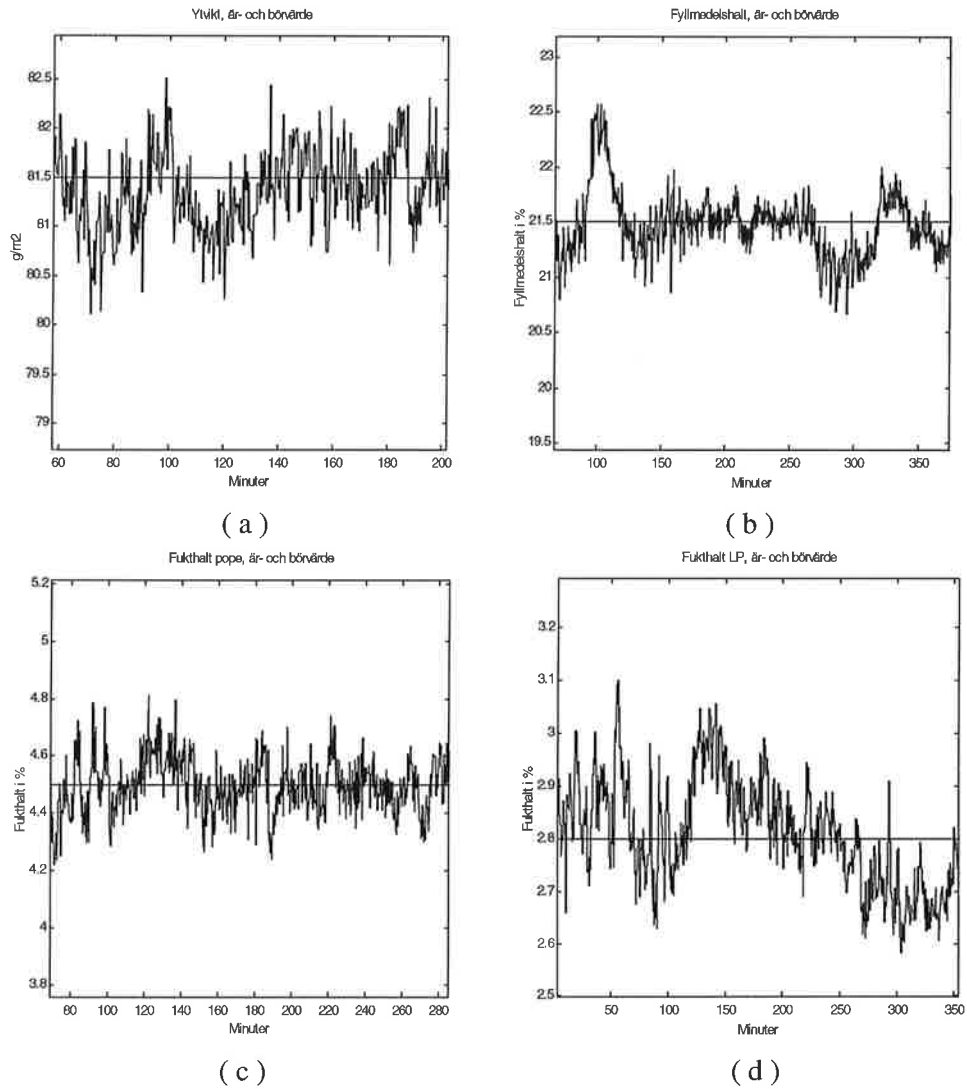
Under drift lagras data på en mängd olika variabler i en databas (MOPS) och sparas från två månader till ett år beroende på betydelse hos variabeln. Data avläses en gång i minuten utan någon hänsyn tagen till vikiningsfiltrering. Dessa data användes därför mest för att hitta möjliga samband i trender. Till Measurex nätverk anslöts en datalogger för snabbare loggning av data på variabler som berörde Measurex's regleringar. Sampling av data kunde väljas fritt ned till 1 sampling/sekund. Några vikiningsfilter fanns ej heller vid dessa loggningar. Loggningen utfördes dock oftast snabbare än uppdateringen av data från Measurex. Vid loggning av data på de maskinnära reglerkretsarna användes en bärbar PC ansluten till en PRO-TUNER. Den användes främst vid identifiering av trycklooparna där samplingstiden var 100 ms.

Matlab med simuleringsprogrammet simulink användes som verktyg vid analys av data och framtagandet av processmodeller samt utprovning av pulsbredder för design av egen kort variant av PRBS.

3.2 Analys av kvalitetsstorheterna

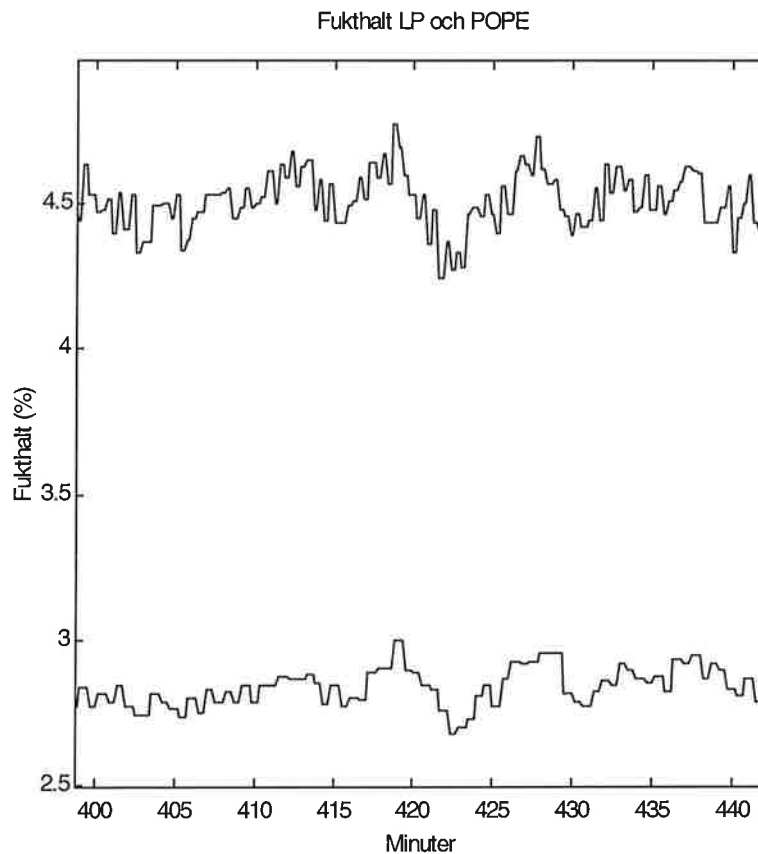
De avgörande storheterna när man pratar om kvalitet på längsregleringen är ytvikt, fukthalt och fyllmedelshalt. Ytvikten mäts rakt av innehållande alla tillsatser inklusive fukthalten. Variationer i ytvikten är därför ofta en orsak av fuktvariationer, därför reglerar man mäldflödet utifrån ett fuktkompenserat värde, kallat torrytvikt. Mäldflödet behöver då inte korrigeras för en störning i ytvikten om den orsakas av fukthalten. Fukthalten i papperet regleras av förtorken och eftertorken vilket innebär två möjliga källor till variationer, alternativt att eftertorken kan parera förtorkens misstag. Fyllmedelshalten är en svårkontrollerad storhet. Retentionen av fyllmedel på virapartiet varierar kraftigt från driftsfall till driftsfall och har en väldigt långsam koncentrationsblandningsprocedur p.g.a. det lilla flödet i förhållande till mäldflödet.

I Figur 3.1 syns exempel på kvalitetstorheternas beteende under drift.



Figur 3.1 Exempel på beteende för kvalitetsstorheterna under drift, där (a) är ytvikt, (b) fyllmedelshalt, (c) fukthalt pope och (d) fukthalt limpress (efter förtorken).

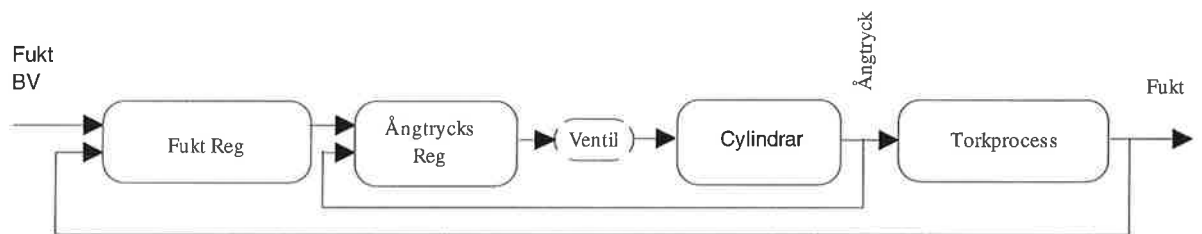
De största avvikelserna i fukthalten upptäcks redan efter förtorken. Eftertorken verkar inte kunna parera dessa störningar se Figur 3.2, eftersom den är ganska kort (få antal torkcylindrar) och i första hand avsedd för att torka limpålägget.



Figur 3.2 Fukt vid limpress nedre kurvan med dess genomslagskraft på fukthalt vid pope den övre kurvan.

3.3 Fuktregeringen

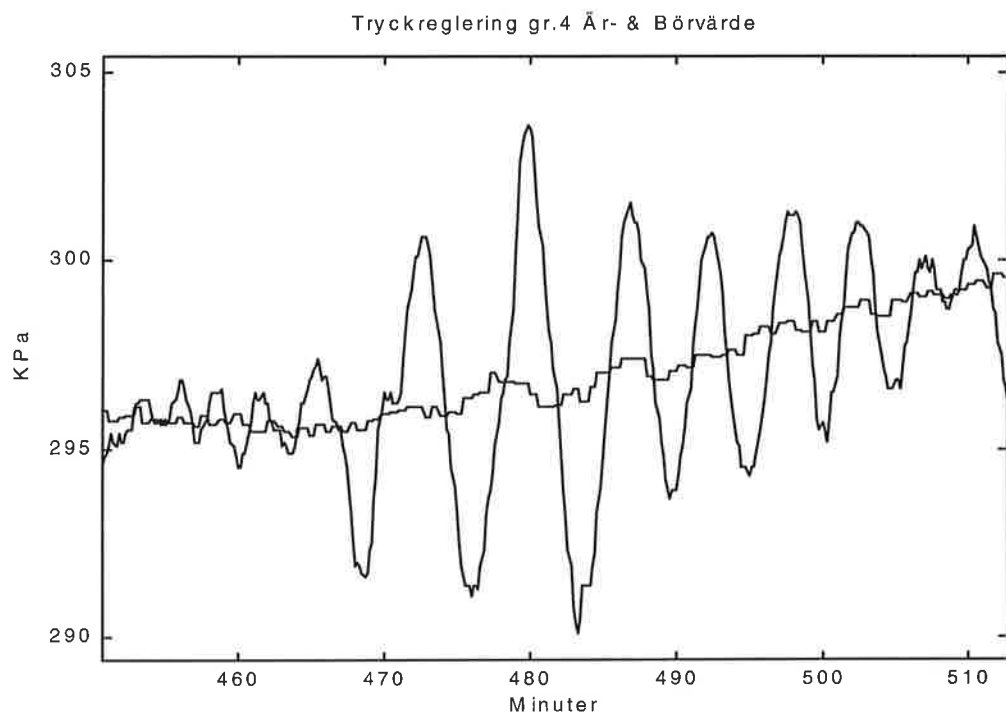
Regleringen av fukthalten i både förtorken och eftertorken kan beskrivas som en kaskadreglering med en inre tryckregleringsloop och en yttre fuktregeringsloop. Trycket i torkcylindrarna är ett bra mått på hur mycket energi som överförs för att torka papperet. Ännu bättre vore det att veta temperaturen på utsidan av cylinderväggarna och reglera mot denna. Problemet med temperaturåterkoppling är att det är för svårt att mäta temperatur på en blank yta med IR-stråle. I det här fallet återkopplas trycket i cylindrarna enligt Figur 3.3.



Figur 3.3 Strukturen för fukthaltsregleringen med ångtrycksreglering som en inre loop i kaskadreglering.

En förutsättning för att den överliggande fuktloopen skall kunna hålla sitt börvärde och parera för störningar är givetvis att den inre loopen klarar att följa börvärdet på ett bra sätt. För att undersöka om så var fallet loggades ärvärde och börvärde på trycklooparna under drift i grupperna 3 och 4 i förtorken samt grupperna 6:övre och 6:undre i eftertorken.

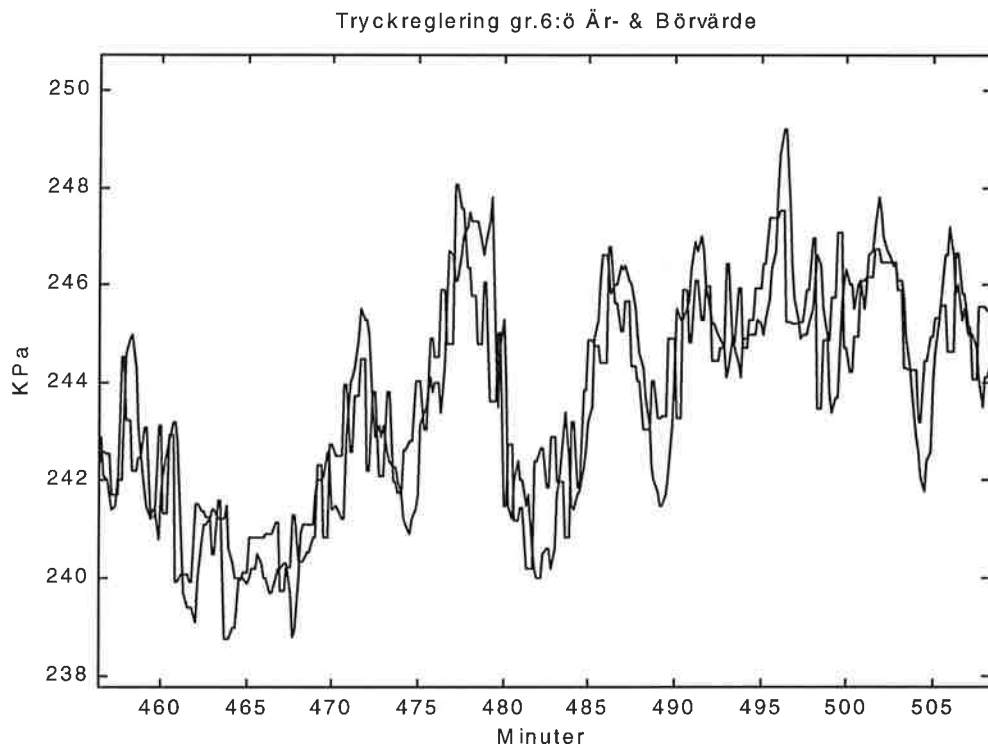
Grupp 3 och 4 erhåller samma börvärde från fuktregulatorn som styr förtorken. Båda grupperna betedde sig likadant och representeras i Figur 3.4 av grupp 4.



Figur 3.4 Tryckregulatorns oförmåga att följa börvärdet i grupp 4. Där den periodiskt oscillerande kurvan är ärvärdet.

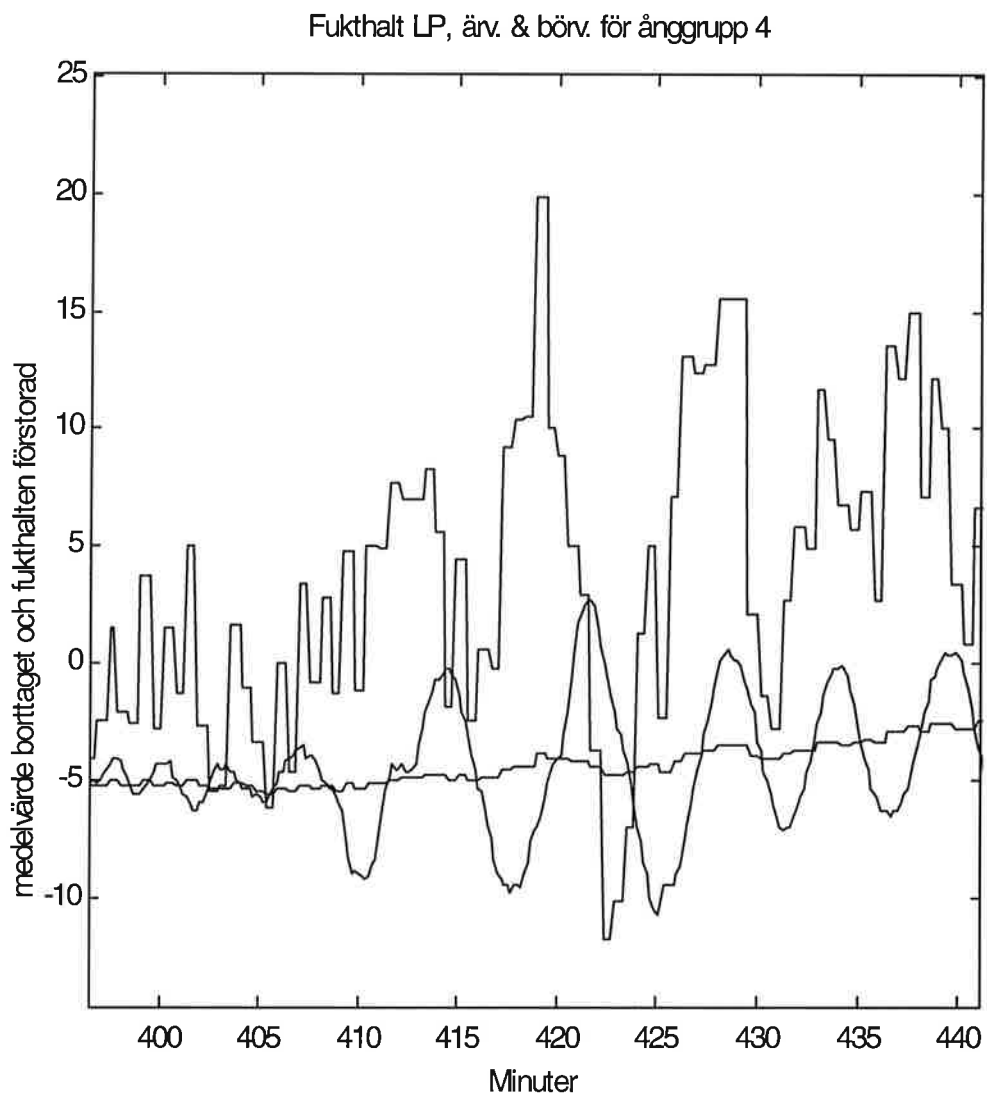
Som synes klarar inte tryckregleringen i förtorken av att följa börvärdet. Trycket i cylindrarna uppvisar en störning med en periodtid på ca 5-6 minuter.

Grupperna 6:övre och 6:undre har inte samma problem men avviker stundtals från börvärdet även dem, Figur 3.5. Data är loggat var 10:e sekund vilket gör det svårt att urskilja är och börvärde. Observera dock vissa avvikelser.



Figur 3.5 Tryckregulatorns oförmåga att följa börvärdet i grupp 6:övre.

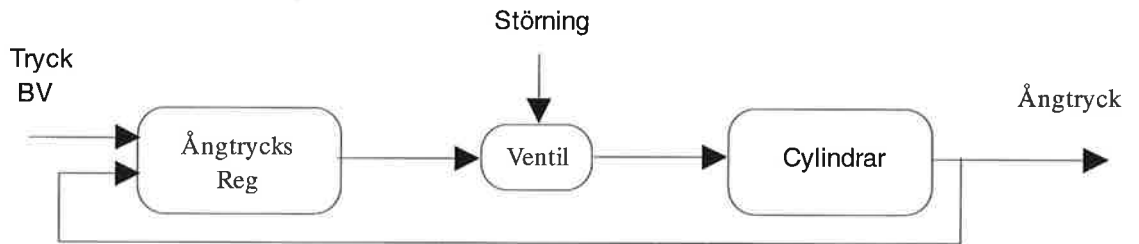
Dessa variationer i tryck resulterade i fuktstörningar i förtorken vilket syns i Figur 3.6.



Figur 3.6 Tryckvariationerna i grupp 4 och dess inverkan på fukthalt vid limpress. De två nedre kurvorna visar ärv- och börvärde medan den övre är fukthalten vid limpress. Ett ökat tryck resulterar i en minskad fukthalt med en viss tidsfördröjning. Skalan på fukthalten är dock förstörad för att tydligare visa fuktvariationerna.

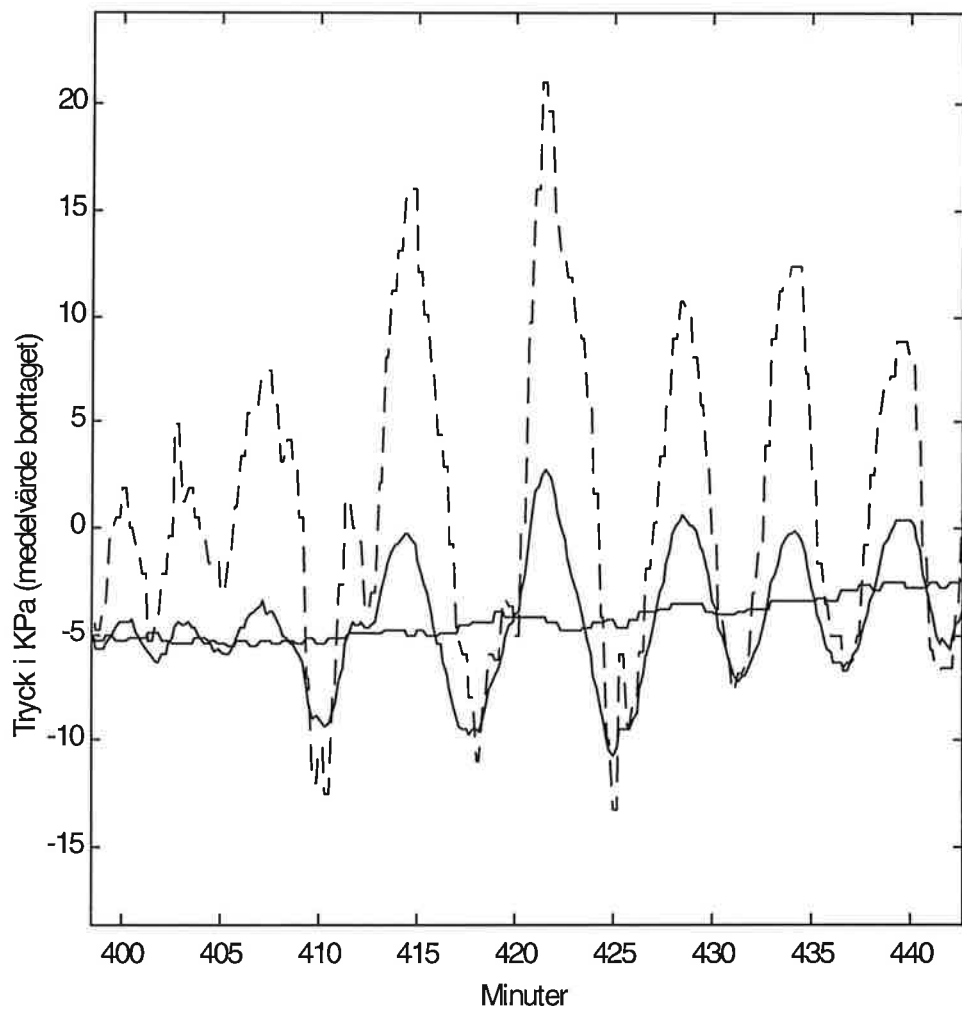
3.4 Tryckregleringen

Ångtrycksregulatorn är en vanlig PID-regulator där D-delen inte används. Störningen på ångtrycket kommer av att ångstammens tryck varierar se Figur 3.8. Ventilens "källa" varierar vilket innebär att störningen kommer in före processen enligt Figur 3.7.



Figur 3.7 Struktur för tryckregleringen där ångstammens variationer kan ses som en störning vilken påverkar ångtrycket. Störningen kommer då in före själva processen.

stamvariationens inverkan på tryckregleringen grupp 4



Figur 3.8 Stamvariationernas inverkan på tryckregleringen. De två nedre kurvorna visar är- och börvärde medan den streckade kurvan visar ångstammens beteende. Som synes följer trycket i gruppen stammens variationer.

Det bästa för regleringen är om störningen kan elimineras. Går inte detta får man göra det bästa av saken och undersöka om regleringen går att dimensionera för att bättre parera störningen.

Eliminera störningen

Ångstammen som förser alla ånggrupper med färskånga skall hålla ett konstant tryck på 460 KPa men klarar av olika anledningar inte detta. Trycket avviker stundtals och periodiskt återkommande ibland ± 15 KPa. Styrningen av ångstammens tryck utreddes noggrant över en två veckors period och beskrivs i kapitlet Ångsystemet. Problemet visade sig dock alldeles för stort för att åtgärdas inom ramen för detta examensarbete. Arbetet med tryckregleringen fick därför inriktas på att identifiera tryckgrupperna och utifrån modellerna göra tryckregleringen mindre störningskänslig.

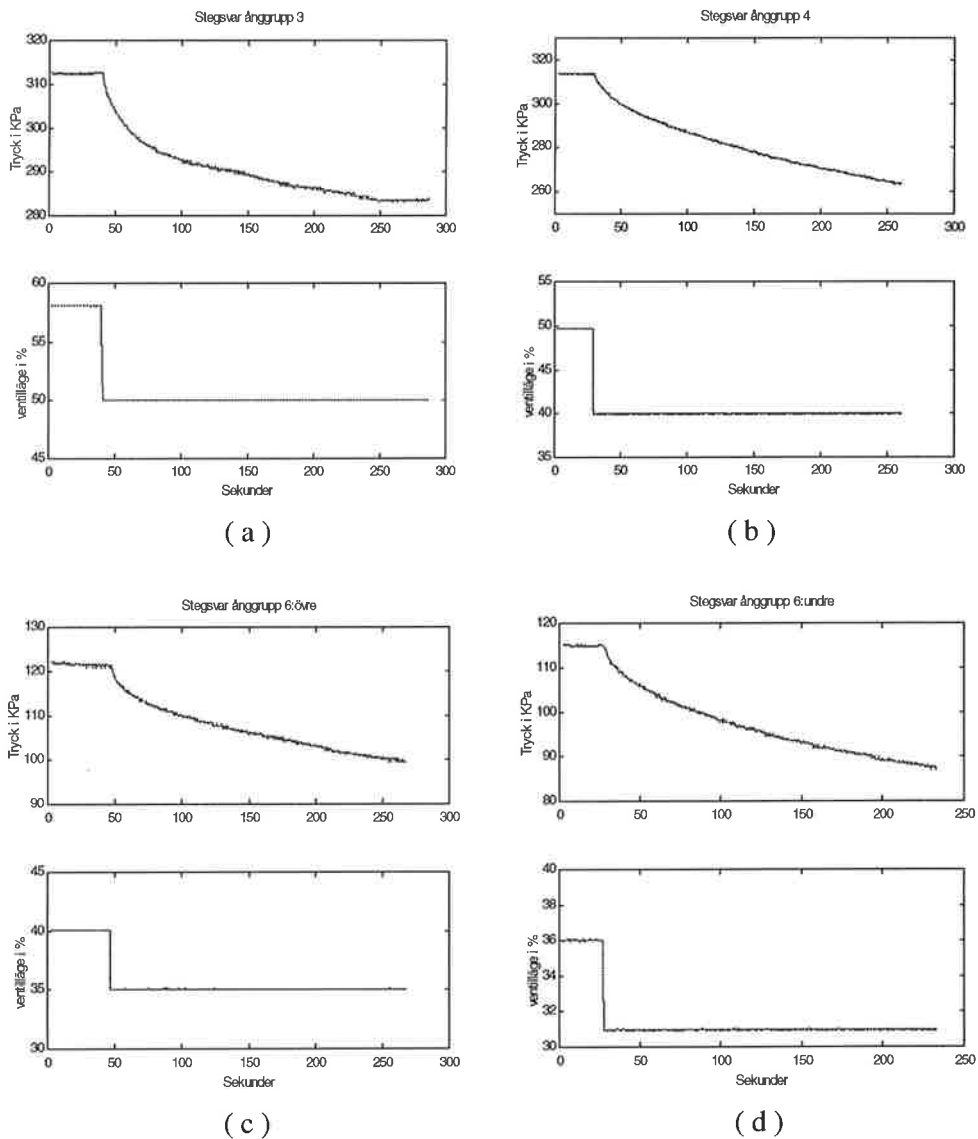
Identifiering av modell för tryck

Torkcylindrarna fylls med het färskånga som hettar upp cylinderväggarna. Samtidigt kondenseras ångan till vatten. För att cylindrarna inte skall vattenfyllas, vilket leder till sämre värmeupptagningsförmåga och tyngre drift, måste kondensatet avlägsnas. Sättet på hur man transporterar bort kondensatet är väldigt avgörande för dynamiken i processmodellen över trycket i cylindrarna. Evakueringen av vattnet görs på de tre maskinerna på olika sätt. Gemensamt för all kondensatevakuering är dock att man ansätter ett så kallat difftryck över cylindrarna, vilket innebär att vattnet pressas ut genom munstycken placerade på olika sätt inne i cylindrarna.

Ånga är ett kompressibelt medium. Detta faktum i kombination med den ständiga evakueringen av kondensat gör ångtrycksdynamiken till en svårtolkad process. Många industrier har problem att finna en bra approximation för modellen över trycket i cylindrarna. Felaktiga modelluppfattningar ger i sin tur dålig reglering.

Vid MoDo Paper i Husum anser man sig ha funnit en bra approximation över beteendet. Modellvalet har därför tillämpats. Med anledning av denna upptäckt anser man sig ligga långt framme vad gäller tryckreglering och vill inte avslöja vilken typ av modell som ansatts.

Ett flertal stegsvar utfördes på de berörda grupperna för att hitta de intressanta modellparametrarna. De mest lyckade stegsvaren och de som använts för identifieringen för respektive grupp visas i Figur 3.9.



Figur 3.9 Stegsvär i ånggrupperna. (a) grupp 3, (b) grupp 4, (c) grupp 6:övre och (d) grupp 6:nedre.

Tuning

Regulatorerna för respektive grupp ställdes in utifrån modelltypen genom att tillämpa polplacering med så snabba reella poler som möjligt och utan att utföra några förkortningar.

3.5 Kvalitetslooparna

3.5.1 Identifiering av processmodeller

För att ställa in Measurex kvalitetsregleringar krävs en modell att mata in i styrsystemet för aktuell process. Identifiering av processerna förtork, eftertork, ytvikt och fyllmedelshalt var därför nödvändiga för att kunna ställa in regleringen.

Förberedelser

För att identifiera dessa processer behövde de störas. Ändringar i kvalitetsstorheterna innebar att kvalitén passerade utanför kasseringsgränserna om förändringarna inte skulle "drunkna" i bruset. För identifieringarna gavs rätten att kassera en tambour per kvalitetsstorhet. En tambour är en rulle papper på maskinen och motsvarar ca 30 ton. Ur identifieringssynpunkt innebär en tambour ca 45 minuter. Inom dessa 45 minuter skulle försöken vara genomförda och ärvärdena tillbaka inom kasseringsgränserna. Som exempel kan nämnas att kasseringsgränserna för fukthalten var (+-) 0.3 procentenheter från börvärdet.

Den korta tiden till förfogande innebar att identifieringssignalen fick designas på egen hand. Färdiga PRBS-signaler exempelvis skapade av matlab skulle innebära alldeles för långa identifieringssekvenser. Pulsbredder i området 1/3-4 ggr den förväntade tidskonstanten för processen handplockades för att få en hyfsad identifieringssignal. För att få rätt amplitud på signalen (flödet, trycket) beräknades ändringen i styrsignal utifrån önskad ändring i utsignal och förväntad statistisk förstärkning hos processen. De befintliga modellerna i Measurex system gav fingervisningar om förväntade modeller och låg därmed till grund för identifieringssignalerna.

Befintliga modeller:

Förtork:

$$K_p = -0.120,$$

$$T = 60 \text{ sek.}$$

Eftertork:

$$K_p = -0.035,$$

$$T = 85 \text{ sek.}$$

Ytvikt:

$$K_p = 0.300,$$

$$T = 60 \text{ sek.}$$

Fyllmedelshalt:

$$K_p = 0.100,$$

$$T = 180 \text{ sek.}$$

Förstärkningsfaktorerna visade sig misstämman kraftigt i vissa fall vilket förklarar korrigeringen av störsignalen under testet med förtorken.

Normalt lämnar mätramen vid pope nya värden var 20:e sekund och mätramen vid limpresen ett nytt var 30:e. Om regleringen kopplas ur kan mätramen låsas vid en fast position och leverera värden var 4:e sekund. Detta kallas punktmätning. Eftersom regleringen ändå kopplades ur under identifieringen kunde punktmätning tillämpas vilket gav bättre precision i skattning av modellerna. Vid vanlig traversering lämnar mätramen ett medelvärde av flera mätningar. Vid punktmätning består inte värdet av lika många punkter vilket gjorde signalen väldigt brusig. För att få bättre skattningar filtrerades punktmätningen med ett inbyggt exponentialfilter med brytfrekvensen vald till 10 ggr högre än den förväntade brytfrekvensen för processen. Filtret inverkar då försumbart lite på processen men minskar bruset i signalen.

Modellval

Som första ansats valdes en ARMAX-modell,

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t). \quad (3.1)$$

Den typen av modell visade sig dock inte riktigt lämplig i sammanhanget. Brusets dynamik visade sig för dominant och gav väldigt skilda versioner av $A(q)$ för olika gradtal på $C(q)$. Därför valdes en modelltyp där brusdynamiken separeras från styrsignaldynamiken. Nämligen Box Jenkins modell,

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t). \quad (3.2)$$

Grovgallring av modellordning

Measurex styrsystem är begränsat till att bara ta emot första ordningens system som modeller över kvalitetsprocesserna. För att se om processen gick att beskriva som en första ordningens process gjordes en grovgallring i modellordning.

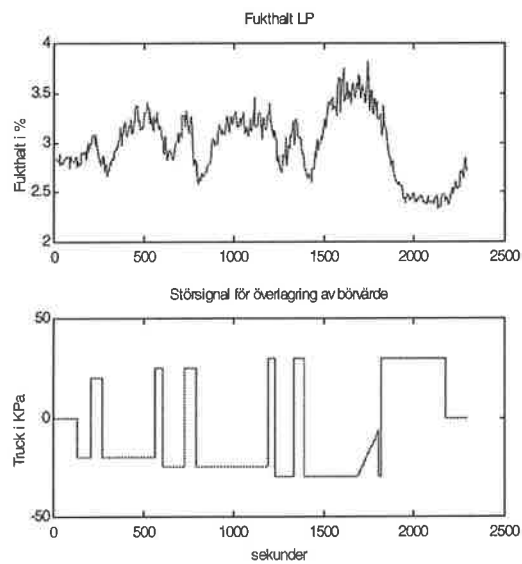
Informationskriterierna AIC (*Akaike's Information Criterion*) och BIC (*Bayesianskt Informationskriterium*) användes för att motivera val av ordningstal på modellen. De två kriterierna beter sig lite olikt. AIC har en tendens att överskatta modellordning medan BIC straffar antal parametrar lite hårdare och därför har en tendens att underskatta modellordningen. För samtliga processer uppvisade BIC minimum för första ordningens modeller medan AIC gav ett lite mer osäkert svar och hellre pekade på en modell av andra ordningen. Med tanke på de begränsade förutsättningarna i systemet valdes dock att skatta

modeller av första ordningen med anledning av BIC's minimum för första ordningens system som motivering.

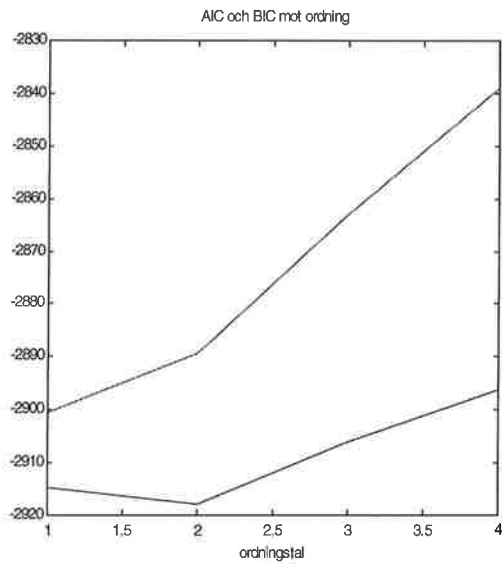
3.5.2 Utförande

Modellerna framtagna nedan baserar sig på mätdata från punktmätning, dödtiderna måste därför modifieras innan modellerna lagras i styrsystemet. Se kapitlet Tuning.

Förtorken



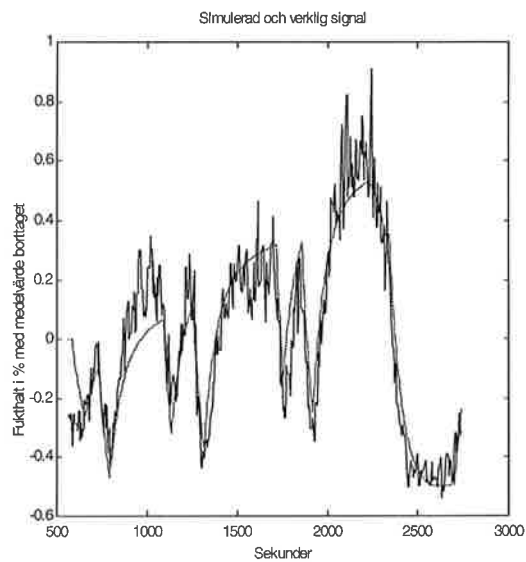
Figur 3.10 Identifieringssignal på trycken i förtorken.



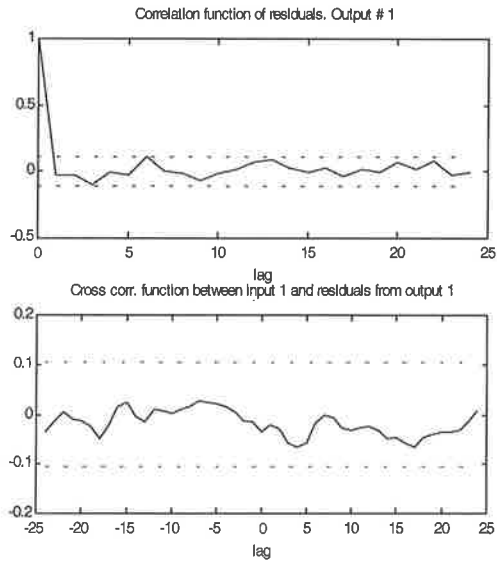
Figur 3.11 AIC (undre) och BIC (övre) mot modellordning.

Ordning	FPE	AIC	BIC
1	0.0045645	-2914.8059	-2900.4719
2	0.0044428	-2917.9314	-2889.2634
3	0.0045738	-2906.0903	-2863.0883
4	0.0046724	-2896.2477	-2838.9117

Slutlig modell med hänsyn till residualanalys.



Figur 3.12 Simulerad modell mot verkliga data.



Figur 3.13 Residualens korrelationsfunktion samt korskorrelationen mellan insignal och residualen.

Följande modell erhöles med de skattade parametrarnas standardavvikelse inom parentes.

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -0.0010]$$

(0.0001)

$$F = [1.0000 \quad -0.9453]$$

(0.0066)

$$C = [1.0000 \quad -0.5848 \quad -0.2050]$$

(0.1138) (0.0653)

$$D = [1.0000 \quad -1.3066 \quad 0.3247]$$

(0.1122) (0.1066)

Efter transformering till kontinuerlig form blev överföringsfunktionen på formen,

$$G(s) = K_p \frac{e^{-sL}}{1 + sT},$$

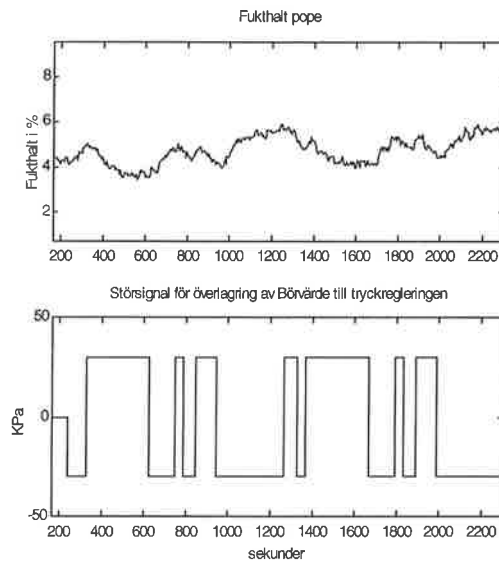
med konstanterna

$$K_p = -0.019,$$

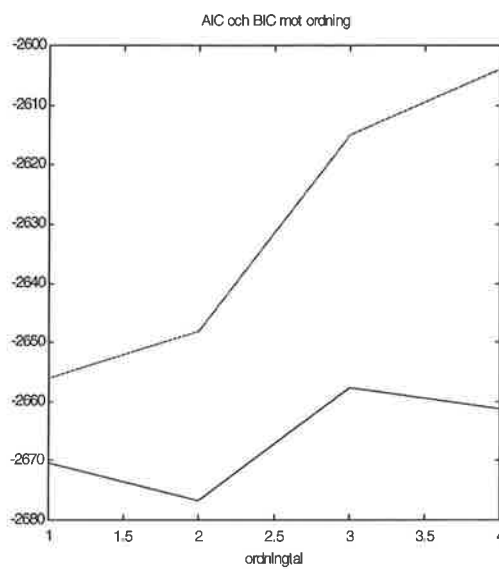
$$T = 71 \text{ sekunder},$$

$$L = 28 \text{ sekunder}.$$

Eftertorken



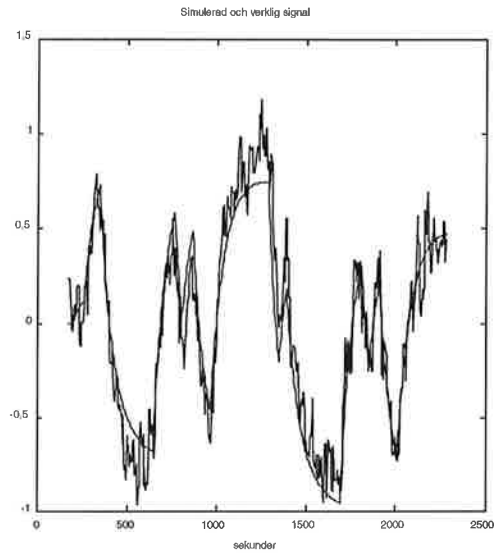
Figur 3.14 Identifieringssignal på trycken i eftertorken.



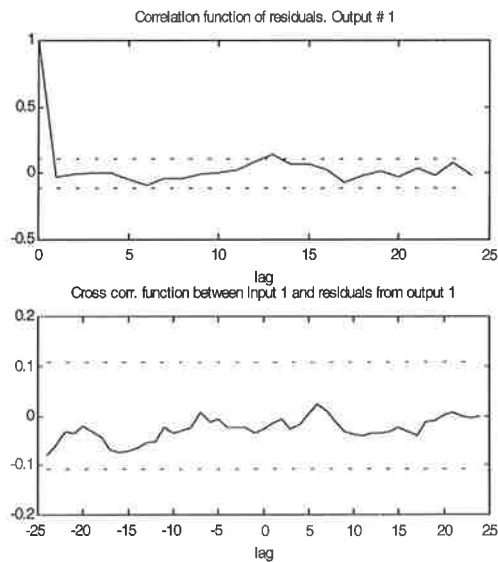
Figur 3.15 AIC (undre) och BIC (övre) mot modellordning.

Ordning	FPE	AIC	BIC
1	0.010089	- 2670.2791	-2655.9905
2	0.0096954	-2676.6528	-2648.0755
3	0.010253	- 2657.7992	-2614.9333
4	0.0099601	-2661.2195	-2604.0651

Slutlig modell med hänsyn till residualanalys.



Figur 3.16 Simulerad modell mot verkliga data.



Figur 3.17 Residualens korrelationsfunktion samt korskorrelationen mellan insignal och residualen.

Följande modell erhöles med de skattade parametrarnas standardavvikelse inom parentes.

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -0.0014] \\ (0.0001)$$

$$F = [1.0000 \quad -0.9474] \\ (0.0042)$$

$$C = [1.0000 \quad -0.7327 \quad -0.1543] \\ (0.0922) \quad (0.0682)$$

$$D = [1.0000 \quad -1.4492 \quad 0.4583] \\ (0.0881) \quad (0.0851)$$

Efter transformering till kontinuerlig form blev överföringsfunktionen på formen,

$$G(s) = K_p \frac{e^{-sL}}{1 + sT},$$

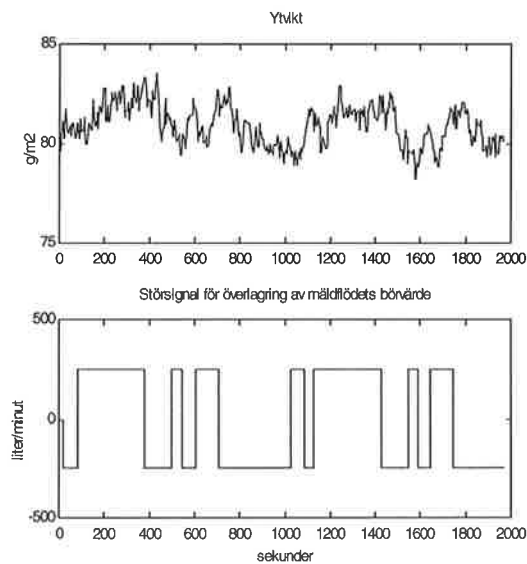
med konstanterna

$$K_p = -0.0272,$$

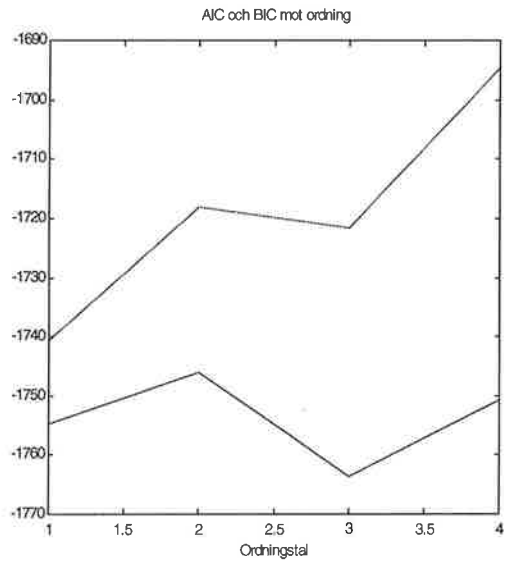
$$T = 74 \text{ sekunder},$$

$$L = 24 \text{ sekunder}.$$

Ytviktsprocessen

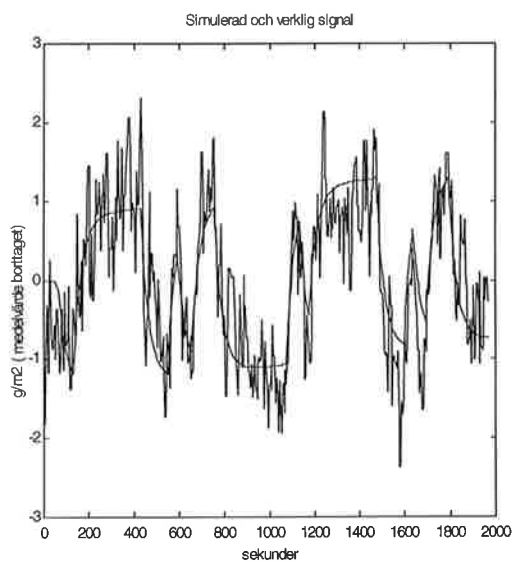


Figur 3.18 Identifieringssignal på mäldflödet.



Figur 3.19 AIC (nedre) och BIC (övre) mot modellordning.

Ordning	FPE	AIC	BIC
1	0.19964	- 1754.7915	-1740.7539
2	0.20336	- 1746.179	-1718.1039
3	0.18631	- 1763.6843	-1721.5717
4	0.19299	- 1750.8007	-1694.6505



Figur 3.20 Simulerad modell mot verkliga data.

Konstanten K_p är förstärkningen från mädlflöde till ytvikt. Measurex system vill ha förstärkningen från torrflöde till ytvikt. K_p måste därför kompenseras för fiberkoncentrationen i mädlflödet som på PM7 håller 3.3%. Genom att dividera K_p med 0.033 erhöles det nya K_p . De slutliga parametrarna blev då

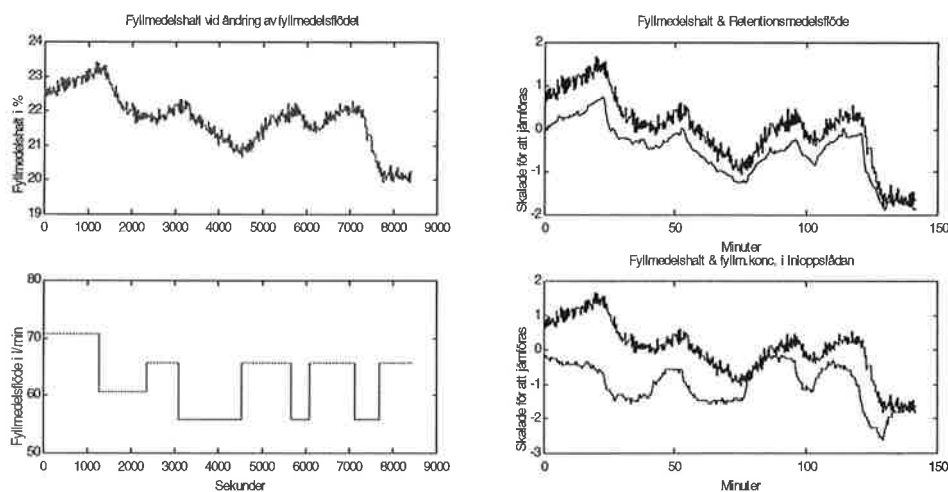
$$K_p = 0.130,$$

$$T = 36 \text{ sekunder},$$

$$L = 52 \text{ sekunder}.$$

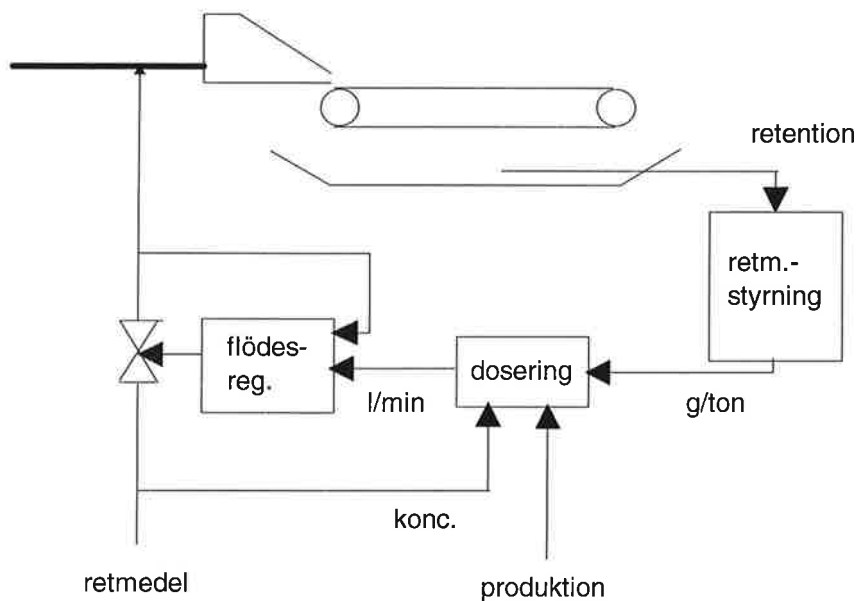
Fyllmedelshaltsprocessen

Två försök genomfördes för identifiering av en modell för fyllmedelshalten som funktion av fyllmedelsflöde. Här var kasseringsgränserna så pass kraftiga att inget papper behövde kasseras. Modellerna som skattades visade sig skilja mycket ifrån varandra. Den första modellen satte systemet i självsvängning medan den andra modellen ledde till en väldigt försiktig regulator. Att variera fyllmedelsflödet stegformat fram och tillbaka verkar ge en felaktig uppfattning om beteendet. Något som dock observerades under försöken var att fyllmedelskoncentrationen i inloppslådan såg ut att reagera som en första ordningens process med död tid som väntat. Vad som dock syntes i papperet som ändring i fyllmedelshalt var snarare en effekt av retentionsmedlets flöde. Se Figur 3.22. En höjning av fyllmedelsflödet resulterade inte i någon ökning av fyllmedelshalten förrän retentionsmedelsflödet började svara.



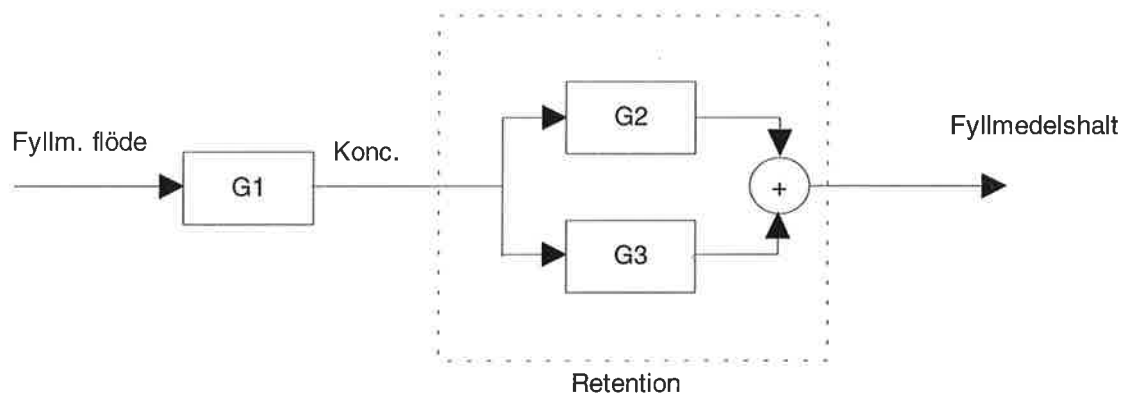
Figur 3.22 Fyllmedelsflöde och retentionsstyrningens inverkan på fyllmedelshalten. Den sanna fyllmedelshalten visar en större samhörighet med retentionsstyrningen än med koncentrationen fyllmedel i inloppslådan. I de två högra plottarna syns sambanden mellan fyllmedelshalt och retentionsmedelsflöde resp. koncentration fyllmedel i inloppslådan i den övre resp. nedre figuren.

Retentionsmedelsstyrningen skall hålla en konstant koncentration av fyllmedel i viragropen enligt Figur 3.23. Ökar man fyllmedelsflödet rasar det mesta tydligen rakt igenom. Sedan börjar retentionsstyrningen att öka doseringen av retentionsmedel och högre halt fyllmedel registreras i papperet.



Figur 3.23 Retentionsstyrningens flödesschema.

En tänkbar strategi när det gäller att identifiera fyllmedelsloopen är att betrakta modellen som Figur 3.24. Där G1 står för dynamiken från fyllmedelsflöde till koncentration fyllmedel i inloppslådan. Sedan bestämmer retentionen hur stor del av fyllmedelspartiklarna som blir kvar i papperet. G2 beskriver en grundretention som blir specifik för viran och typ av fyllmedel och kanske bara kommer att beskrivas som en konstant. G3 däremot får ses som den variabla retentionen innehållande retentionsmedelsstyrningen.



Figur 3.24 Blockschema för tilltänkt modellstruktur för fyllmedelsmodellering där G2 är konstant och maskinspecifik medan G3 är en variabel retentionsfaktor inkluderad retentionsmedelstyrningen. G1 beskriver koncentrationsutjämnningen i inloppslådan.

Styrningen av retentionsmedlet som en funktion av retentionen i virapartiet är idagsläget en långsammare process än själva koncentrationsutjämnningen i inloppslådan. Innan allvarliga försök görs att hitta en modell för fyllmedelshalten bör retentionsstyrningen först vara optimerad. Snabbheten för den processen får sedan avgöra om fyllmedelsloopen skall göras snabbare eller långsammare än retentionsmedelsstyrningen.

Trots dåliga resultat vid framtagandet av modell såg det ändå ut som om regleringen gick att förbättra bara genom att manuellt ändra regulatorparametrarna och studera beteendet hos fyllmedelsflödet.

Styrlagen för Measurex regulator går att jämföra med en dödtidskompenserad PI-regulator om den skrivs på formen (2.27). Med känsla för hur en PI-regulator beter sig och uttryck motsvarande K och T_i kunde regleringen förbättras empiriskt. Measurex regulator såg ut att skapa överslängar p.g.a. för stor I-verkan. Genom att förlänga tidskonstanten i processmodellen minskade den integrerande funktionen. Sänktes processens statiska förstärkning ökade proportionaldelen. Dödtiden från identifieringsförsök två på 180 sekunder verkade rimlig och användes.

3.6 Tuning

Med känd processmodell finns bara en design- eller tuningsparameter i Measurex regulator, nämligen α . Det är samma parameter som T_{cl} som beskrivs i avsnittet lambdatuning. Faktorn λ som avgör $\alpha = \lambda T$ alternativt $\alpha = \lambda L$ brukar väljas 0.5-3. Har man system med dödtid bör λ inte väljas lägre än 1. Vid test av de nya parametrarna valdes λ till 2. Visar det sig att regleringen fungerar bra kan man successivt minska

värdet för att öka snabbheten att parera störningar, vilket främst är tanken med regleringen av kvalitetsstorheterna. Börvärdesändringar sker bara vid kvalitetsomställning.

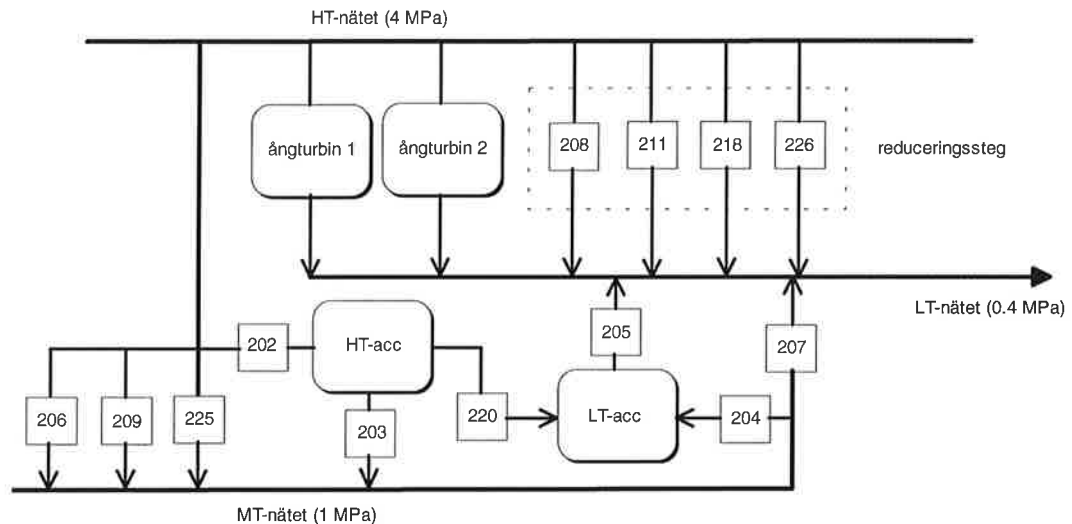
Dödtiderna för modellerna är de sanna dödtiderna för processerna. Regulatorerna kommer dock att känna av en längre dödtid eftersom det tar 20 sekunder för mätramena att traversera och lämna ett nytt värde. Dödtiden för regulatorn kommer därför att uppfattas som den sanna plus i medeltal halva tiden för traversering. Eftersom båda mätramarna traverserar lika snabbt skall 10 sekunder adderas till dödtiderna innan de matas in i systemet. Den här extra fördröjningen måste givetvis ändras om hastigheten på mätramarna snabbas upp.

3.7 Ångsystemet

Ånga skapas i sk. ångpannor vilka värms genom eldning av soda, bark eller olja. Energin som ångan innehåller kan nyttjas av ett tiotal olika typer av konsumenter. Pappersmaskinerna är en av konsumenterna och använder ångtryck för torkning av papperet. Vid själva kokningen bildas ett ångtryck på 4 MPa. För de flesta konsumenter innebär det ett onödigt högt tryck. Ångsystemet består därför av tre trycknivåer för att anpassa trycken till olika konsumenters behov utan för stora förluster. De tre nivåerna eller nät som de också kallas se Figur 3.25 är Högtrycksnätet (HT-nätet 4 MPa), Mellantrycksnätet (MT-nätet 1 MPa) och Lågtrycksnätet (LT-nätet 0.4 MPa), där LT-nätet är det mest intressanta för pappersmaskinerna och de flesta andra av konsumenterna.

Den energi som lagras i HT-ångan under ångproduktionen är mer än vad som förbrukarna gör av med, därför passerar ångan två parallella ångturbiner när den transformeras ner till LT-ånga. Turbinen omvandlar överflödig energi till elenergi vilket gör fabriken mer eller mindre självförsörjande på el.

3.7.1 Struktur av ångtrycksnäten



Figur 3.25 Ångsystemet bestående av tre trycknivåer, LT-nätet, MT-nätet och HT-nätet. Två parallella ångturbiner, buffertackumulatörer och reduceringssteg med tillhörande ventilstyrningar. Intressanta ventiler med tillhörande regulator och regulatornummer är markerade med ruta och nummer.

Mot LT-nätet är ett tiotal konsumenter anslutna däribland de tre pappersmaskinerna. Konsumtionen av LT-ånga varierar kraftigt beroende på vilka som för tillfället förbrukar ånga och med vilken mängd. Om exempelvis en eller två av pappersmaskinerna får ett avbrott minskar förbrukningen av ånga på LT-nätet. Leveransen av ånga måste då minskas för att inte trycket ska skena iväg.

Leveransen av ånga till HT-nätet kan i viss mån styras av ångpannornas effekt. Dessa får dock anses som väldigt långsamma processer i förhållande till resten av ångsystemet, vilket ger pannorna begränsad förmåga att kompensera för kortare variationer i konsumtionen. Detta faktum är en grundläggande orsak till att man prioriterar HT-nätet som nummer ett vid regleringen av trycken i de olika näten.

Akkumulatörer

För att inte behöva ändra så mycket på styrningen av ångpannorna har man två stora tryckkärl, HT-ackumulatören och LT-ackumulatören. Dessa skall fungera som buffertar och därmed tillåta ångpannorna att ligga kvar på normal produktion vid kortare konsumtionsökningar, -minskningar. De kan även tjänstgöra som avlastare för att hinna minska effekten i ångpannorna vid stora snabba tryckökningar på HT-nätet.

HT-ackumulatören har som huvuduppgift att hålla en jämn nivå på HT-nätet medan LT-ackumulatören i första hand jobbar med att hålla LT-nätet inom vissa gränser.

Reduceringssteg

I de fall när trycket på LT-nätet av olika anledningar snabbt sjunker och turbinen inte hinner parera eller går för fullt och därför inte har mer att ge sitter det ventiler direkt mellan HT-nätet och LT-nätet. Genom att öppna dessa kan man snabbt parera trycksänkningar. Observera att reduceringsstegen bara kan verka för att höja trycket och inte för att sänka det.

3.7.2 Styrning av ångnäten

Över varje ventil sitter en regulator som har för avsikt att styra trycket före eller efter ventilen beroende på uppgift hos ventilen. Varje ventil med regulator som är intressant i sammanhanget representeras i Figur 3.25 med en ruta och nummer där numret står för nummer på regulatorn i systemet.

Börvärden till alla regulatorer erhålls av ett övergripande styrprogram. Programmet känner av tryck vid olika positioner i systemet och jämför dessa med empiriskt framtagna fasta minimum- och maximumnivåer samt aktiverar utifrån dessa lämpliga regulatorer med lämpliga börvärden. Se bilaga 2. Styrprogrammets strategi är att prioritera HT-nätet först sedan LT-nätet och sist MT-nätet. MT-nätet kommer därför att fungera som en sista buffert när inte ackumulatorerna kan ta åt sig mer.

Hamnar man trots allt i situationen att alla depåer är fyllda och minskning av kokugarna inte räcker för att minska trycket i näten, finns inget annat att göra än att släppa ut överflödiga ånga i luften genom så kallade säkerhetsventiler. Detta vill man i möjligaste mån försöka undvika av ekonomiska skäl men är ibland tvungen för att inte skada systemet.

3.7.3 Brister i regleringen av ångnäten

Efter några veckors jobb med att försöka förstå sig på styrningen av ångnätet konstaterades sedan att uppgiften att förbättra LT-nätets reglering var en alldeles för stor uppgift att angripa inom ramen för detta examensarbete. Under tiden upptäcktes dock vissa intressanta faktorer som kan vara av intresse för vidare utveckling och som motivering till variationerna på ångstammen till pappersmaskinerna.

Dödband

Ständiga justeringar av ventiler leder till slitage i ställdon och axelbussningar. I ett försök att minska slitaget har man manipulerat med styrsignalen från regulatorn. Mellan

regulatorn och styrdon sitter en byggsten som i systemet heter ”tobb”. Den fungerar som ett dödband för styrsignalen. Tanken är god, men att införa ett dödband efter regulatorn förvärrar snarare situationen, eftersom regulatorn inte är medveten om att den inte har gjort någon förändring på styrdonet. Dödbandet efter regulatorn kan beskrivas som ett extra glapp i ventilen. Ett bättre sätt att skona ventilerna är istället att utnyttja det redan förberedda dödband på ingången till regulatorn. Då uppdateras inte styrsignalen förrän det behövs och den för regulatorn synliga hysterese hos ventilen kommer att minska.

Avstängda regulatorer

Av okänd anledning ligger vissa ventiler ej i reglering. Dessa är mer eller mindre öppna och släpper därmed igenom störningar rakt av.

Följande regulatorer (ventiler) ligger i manuellt läge:

styrning av LT-ackumulatormed regulatorerna

204,

205,

220.

reduceringssteg med regulatorerna

225,

226.

Parallella reglerloopar

Reduceringsstegen mellan HT-nätet och LT-nätet och reduceringsstegen mellan HT-nätet och MT-nätet jobbar parallellt mot samma tryck. De har var för sig egna tryckgivare vilket innebär att de mäter trycket på flera olika ställen på nätet. Varierar trycken lokalt, eller om givarna är olika kalibrerade, kommer regulatorerna att jaga varandra. Detta kan undvikas om alla regulatorer återkopplas med samma fysiska signal alternativt ett medelvärde av flera. Huvudsaken är att alla regulatorer jobbar mot samma ärvärde.

Alla regulatorer i reduceringsgruppen är PI-regulatorer. Parallella PI-regulatorer kan också göra att de jagar varandra. Beroende på integrationsförstärkningen regulatorerna emellan kan integrationstillstånden vara olika hos regulatorerna och därmed motverka varandra i vissa situationer. Detta undviks genom att bara införa I-del i en av regulatorerna alternativt att styra alla ventiler med en PI-regulator.

Turbinerna styrs parallellt oberoende av varandra när båda arbetar samtidigt, vid undersökningen gick bara en av turbinerna. Om de påverkar varandra är därför svårt att säga.

Turbinregleringen

Befintlig reglering kring turbinen återkopplas mot effektutveckling. Man sätter börvärden i MW till turbinregleringen och antar att ett högre effektuttag genererar ett större ångflöde,

som i sin tur höjer trycket i LT-nätet. För styrningen av trycket vore det nog bättre att återkoppla turbinen mot trycket på LT-nätet i stället för effektutveckling.

Turbinen har en övre gräns för hur mycket effekt den kan utveckla. Har den nått denna gräns ger inte ett ökat flöde någon ökning i effektutveckling. Denna övre gräns sjunker i takt med att turbinen blir smutsig. I styrprogrammet anger man därför en högsta nivå för börvärdet till turbinstyrningen.

I takt med att verkningsgraden sjunker blir den högsta nivån för börvärde i styrprogrammet högre än turbinens faktiska kapacitet. Här uppstår då en typ av windup. Om börvärdet har överstigit turbinens kapacitet och styrprogrammet uppmanar en sänkning av effekten för att sänka trycket, kommer turbinregulatorn att minska börvärdet, men flödet genom turbinen kommer inte att avta förrän börvärdet sjunkit till turbinens för tillfället högsta effektutveckling. När turbinen nyligen är rengjord är detta inget problem eftersom gränserna stämmer överens. För att få en bättre styrning av trycket, bör den övre gränsen i styrprogrammet sänkas automatiskt i takt med turbinens minskade maximala effektutveckling. Ett enklare sätt vore att återkoppla mot ventilläge.

3.7.4 Styrprogrammet

Styrprogrammet är ett stort sekvensdiagram som känner av tryck på flera intressanta ställen i ångsystemet. Se bilaga 2. Om HT-nätet ligger inom vissa trycknivåer, känner systemet av trycket på LT-nätet och rampar börvärdet till turbinstyrningen inom en högsta och en lägsta nivå. Passerar trycket på LT-nätet över en övre gräns, rampas börvärdet till turbinen ner och vänder och rampar upp igen, om trycket på LT-nätet sjunker under den nedre gränsen på LT-nätet. Börvärdet till turbinstyrningen intar aldrig en jämviktsnivå annat än när den ligger på övre eller nedre gräns för börvärdet. Sättet att styra turbinen skapar snarare svängningar än motverkar dem. Liknande börvärdesändringar görs till de flesta av ventilerna i systemet, men syns tydligast vid turbinregleringen eftersom den är största leverantör av ånga till LT-nätet.

Utan allt för stora ingrepp borde man kunna byta ut rampningen av börvärde som det är nu, till att beräkna en styrsignal via en enkel regleralgoritm. Den relaterar det nya börvärdet till skillnaden mellan önskat tryck på LT-nätet och det verkliga. Då skulle börvärdet finna en jämviktsnivå när den inte parerar för störningar (ökning/minskning av förbrukning). Regleralgoritmen kräver ändå en viss övervakning, eftersom HT-nätet prioriteras och därmed helt kan överordna sig styrningen av LT-nätet.

4. RESULTAT

På samtliga kvalitetsloopar märktes förbättrad reglerprestanda efter identifiering och inställda regulatorer. Största orsaken till förbättringar får anses bero på tryckregleringens uppsnabbning.

Som kvalitetsmått på regleringarna av kvalitetsstorheterna användes ISE (*Integrated Squared Error*),

$$ISE = \frac{1}{tf} \int_0^{tf} e^2(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_1^N e^2(t). \quad (4.1)$$

Där $e(t)$ är reglerfelet och N antal datapunkter. ISE kan enkelt användas för att beräkna det vanligt förekommande spridningsmåttet

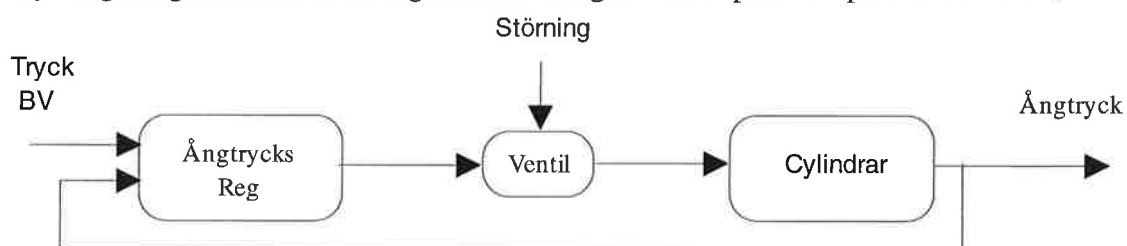
$$2\sigma = 2\sqrt{ISE} \quad (4.2)$$

vilket omfattar 95% av alla avvikelser. Data för jämförelse av ISE före och efter genomfört arbete har valts att hämtas slumpvis utan kännedom om driftsituation. Närmare bestämt från 1-6 Maj -97 för $ISE_{FÖRE}$ och från 1-6 September -97 för ISE_{EFTER} . Serier med samma börvärden på ytvikt, fukthalter och fyllmedelshalt har klistrats ihop. Perioder med avbrott har även plockats bort. Detta resulterade i dataserier med en längd av ca 2-3 dygn med data loggade en gång i minuten.

Kvaliteten på papperet beror inte bara av de överliggande kvalitetslooparna. Maskinen går därför lite olika från dag till dag beroende på fler underliggande reglerloopar och dess driftslägen. ISE får därför studeras med en viss restriktion. Det går inte att garantera att de två perioderna för jämförelse har samma driftsförutsättningar. Måttet ISE ger i alla fall en god fingervisning om trenden.

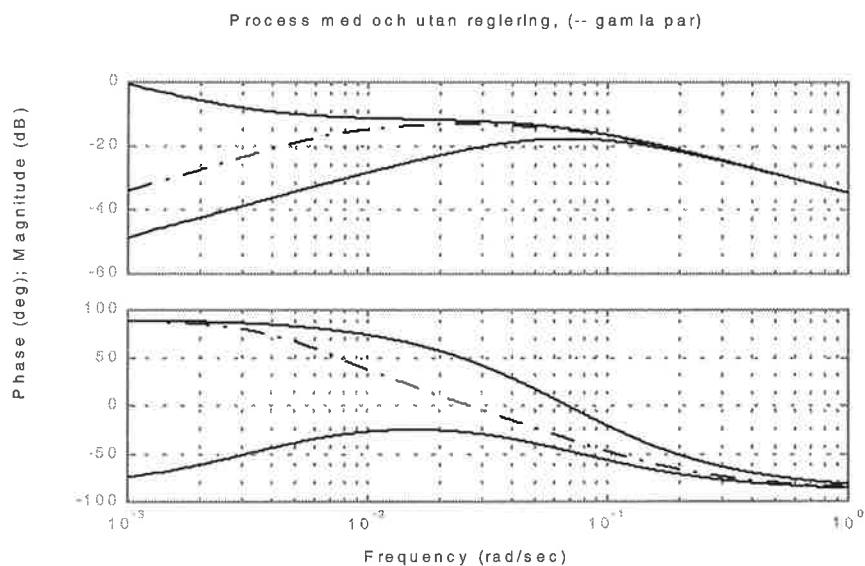
4.1 Tryckregleringen

Tryckregleringen störcdes av att ångstammen svängde med en periodtid på ca 5-6 minuter.



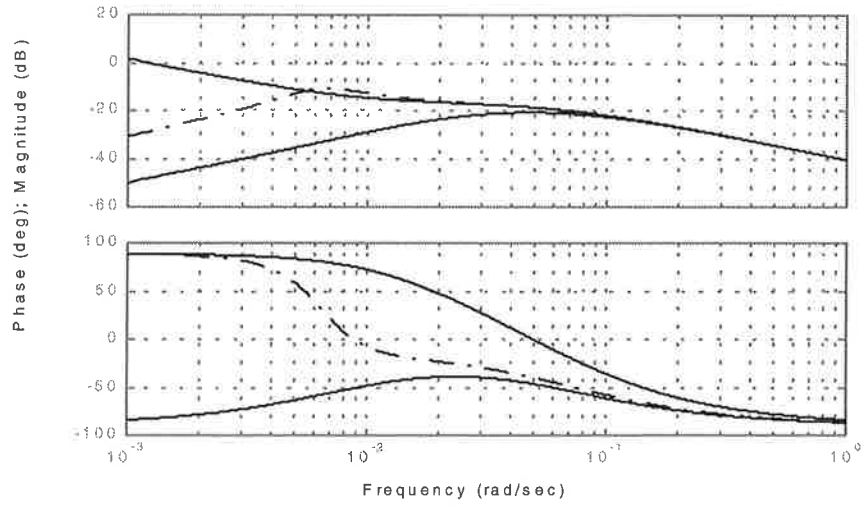
Figur 4.1 Struktur för tryckregleringen.

Störningens inverkan på ångtrycket i cylindrarna, utan reglering samt med nya och gamla reglerparametrar visas nedan i bodediagrammen. Störningen uttryckt i rad/sek blir med 6 och 5 minuters periodtid 0.0175 resp 0.0209 rad/sek. Samtliga ånggrupper dämpar nu stammens inverkan kraftigare, grupperna i förtorken ca 10-20 dB extra jämfört med innan optimering.



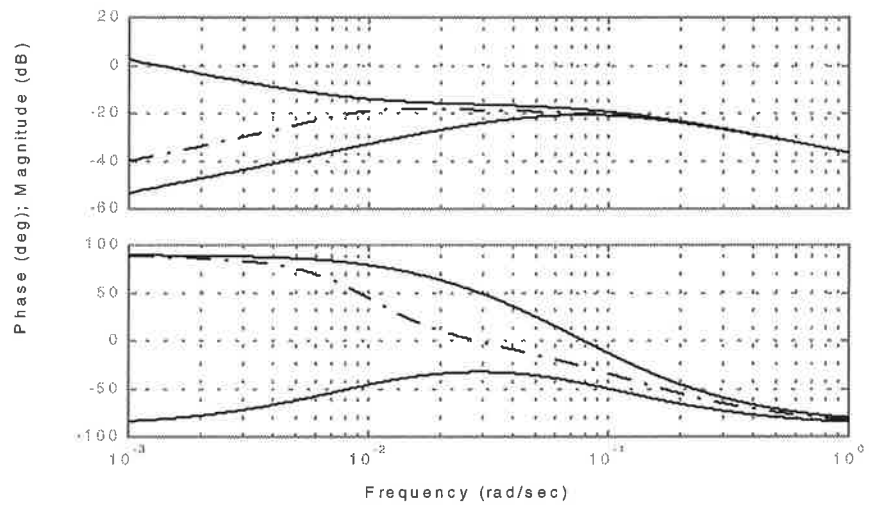
(a)

Process med och utan reglering, (-- gamla par)

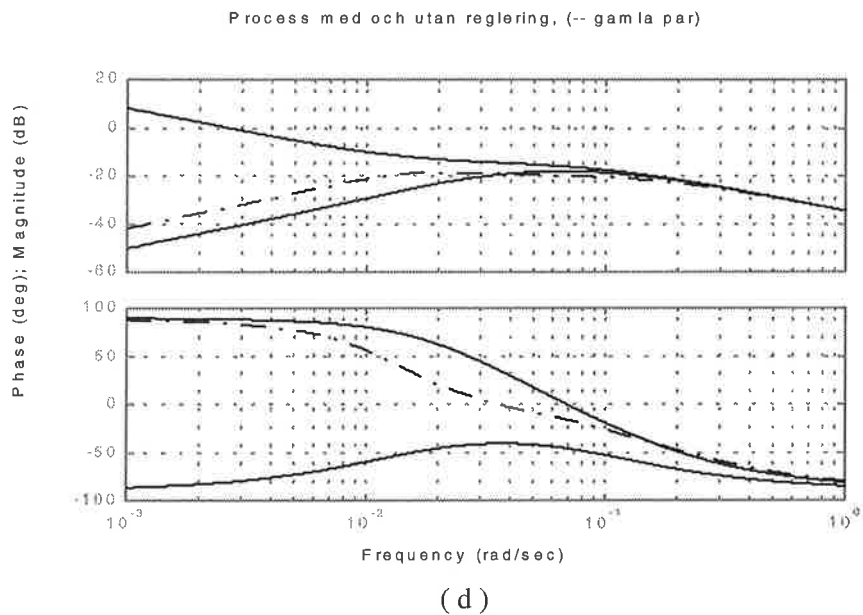


(b)

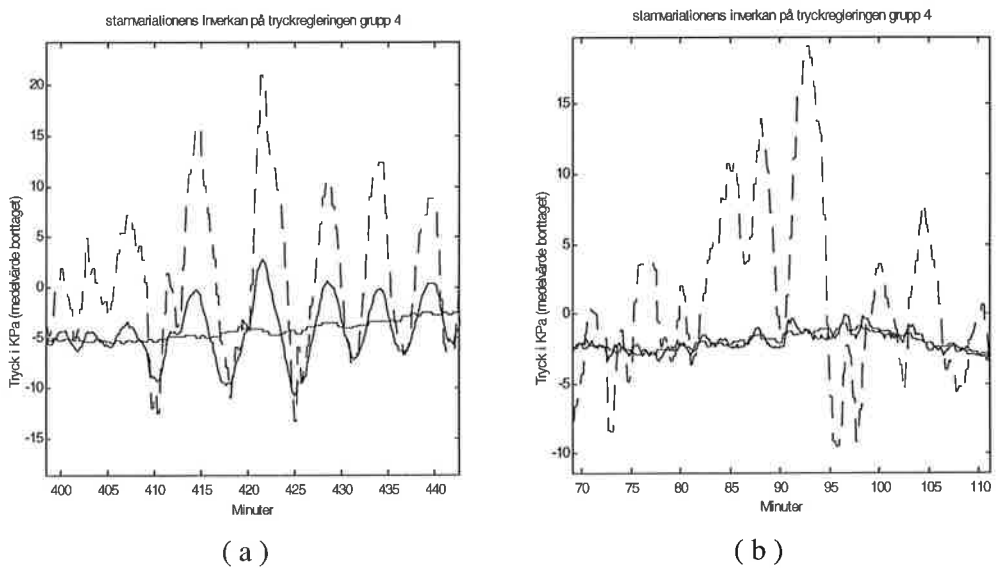
Process med och utan reglering, (-- gamla par)



(c)



Figur 4.2 Bodediagram för dämpning av störningar på ångstammen utan reglering samt före (--) och efter. I grupperna (a) grupp 3, (b) grupp 4, (c) grupp 6:övre, (d) grupp 6:undre.



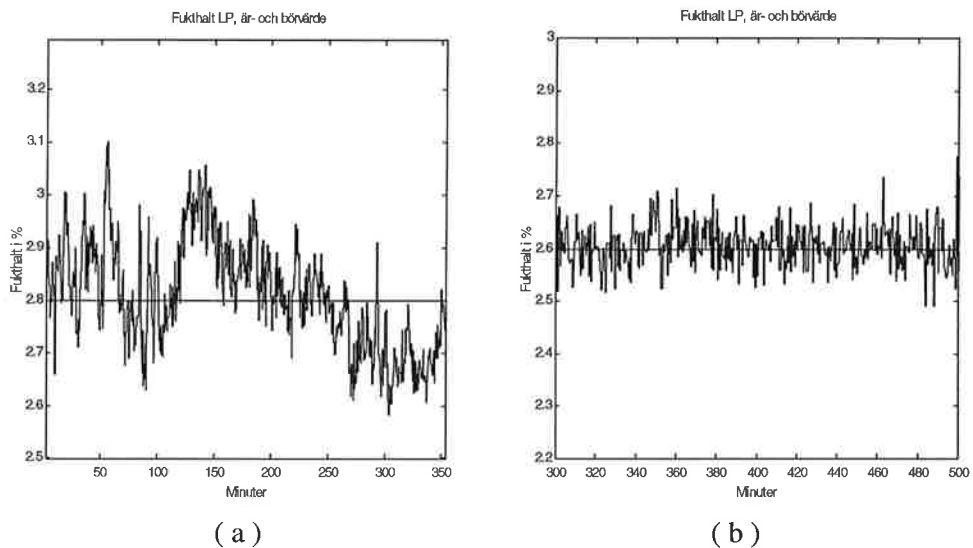
Figur 4.3 Verkliga data på tryckregleringen (a) före och (b) efter vid jämförbara störningar på ångstammen (--).

4.2 Kvalitetslooparna

Avvikelserna hos kvalitetstorheterna visade sig minska. Spridningsmättet ISE presenteras före och efter optimering. 2σ -spridningen ges också med medelvärdet inom parentes. Nedan visas exempel på beteendet före och efter optimering samt känslighetsfunktionen i Bodediagrammen vilket visar regulatorns förmåga att parera störningar för olika frekvenser. Bodeplottarna är gjorda med designparametern $\lambda = 2$.

Förtorken

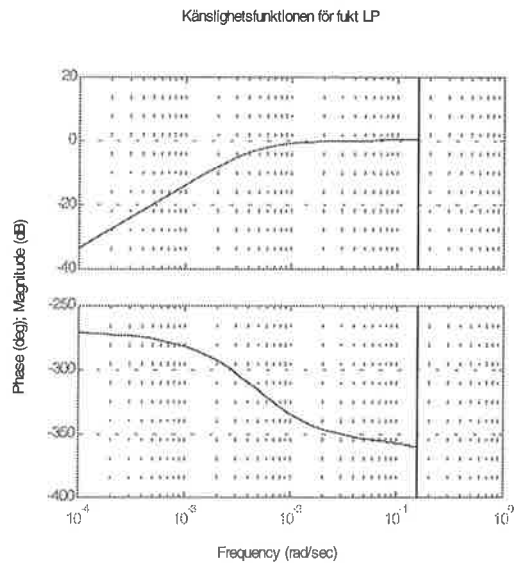
Regleringen av förtorken var innan optimering alldeles för försiktig och klarade därmed inte av att parera störningar speciellt bra.



Figur 4.4 Verkliga data på fukthaltsregleringen i förtorken (a) före och (b) efter.

$$ISE_{\text{FÖRE}} : 0.0130. \quad 2\sigma : 0.228 (2.8)$$

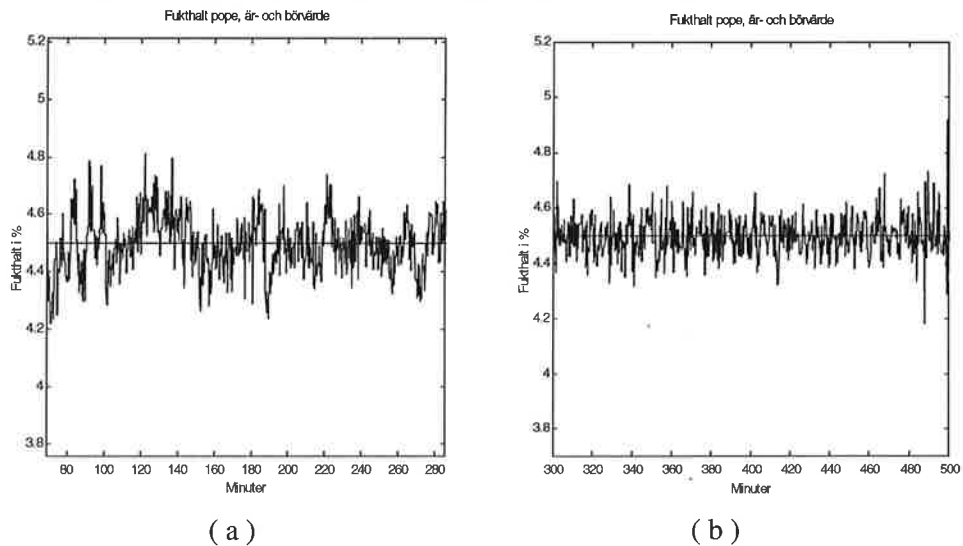
$$ISE_{\text{EFTER}} : 0.0039. \quad 2\sigma : 0.125 (2.6)$$



Figur 4.5 Känslighetsfunktionen för fukthaltsregleringen i förtorken.

Eftertorken

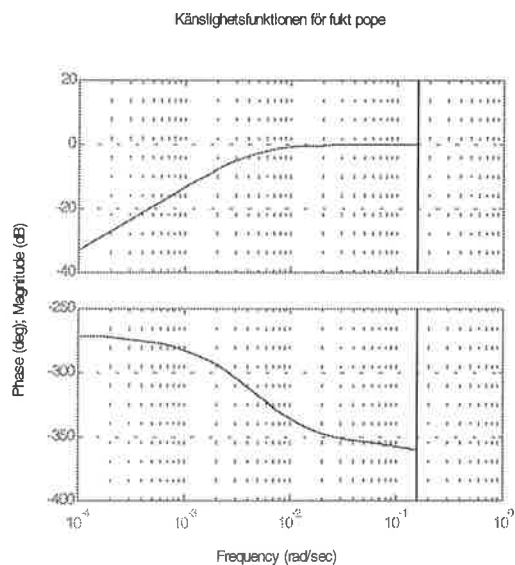
Modellen för eftertorken skilde sig väldigt lite ifrån den tidigare modellen. Merparten av förbättringarna i reglerkvalité kommer nog av att förtorken gör ett bättre förarbete.



Figur 4.6 Verkliga data på fukthaltsregleringen i eftertorken (a) före och (b) efter.

$$ISE_{\text{FÖRE}} : 0.0134. \quad 2\sigma : 0.232 \text{ (4.5)}$$

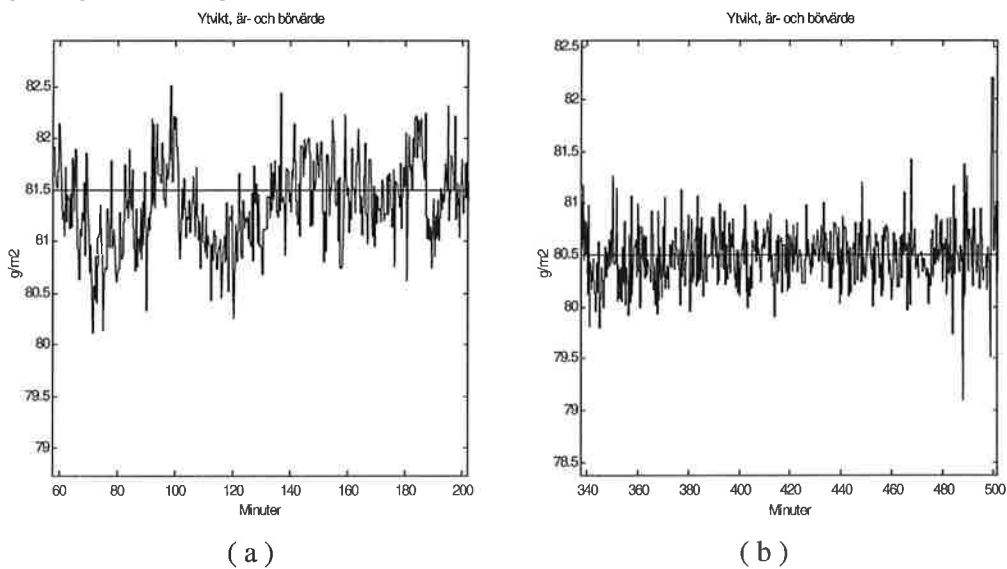
$$ISE_{\text{EFTER}} : 0.0048. \quad 2\sigma : 0.139 \text{ (4.5)}$$



Figur 4.7 Känslighetsfunktionen för fukthaltsregleringen i eftertorken.

Ytvikten

Med en kortare tidskonstant och lite högre förstärkning i processmodellen verkar regleringen sköta sig bättre.



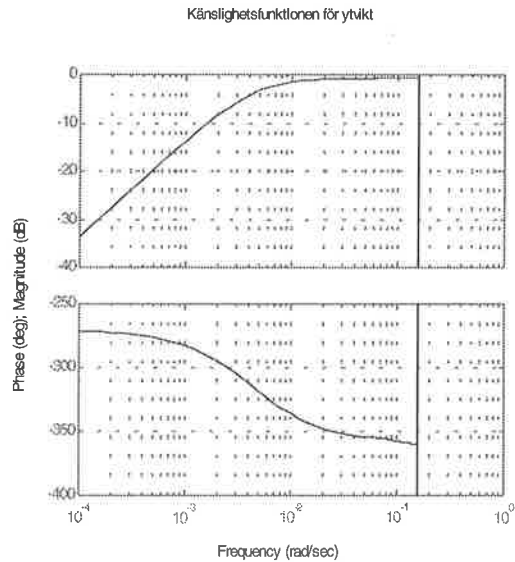
Figur 4.8 Verkliga data på ytviktsregleringen (a) före och (b) efter.

$$ISE_{\text{FÖRE}} : 0.094.$$

$$2\sigma : 0.613 \text{ (81.5)}$$

$$ISE_{\text{EFTER}} : 0.056.$$

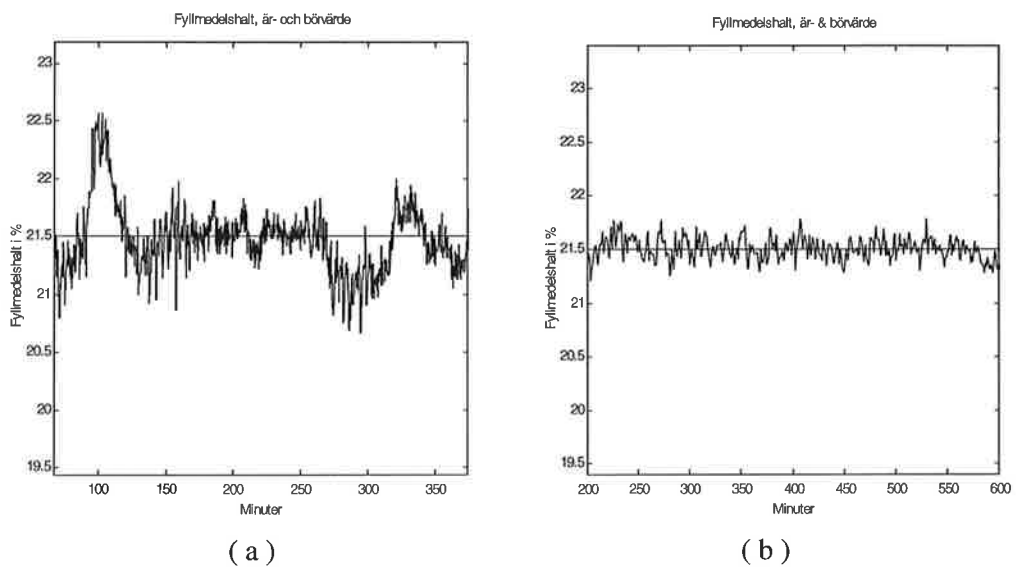
$$2\sigma : 0.473 \text{ (80.5)}$$



Figur 4.9 Känslighetsfunktionen för ytviktsregleringen.

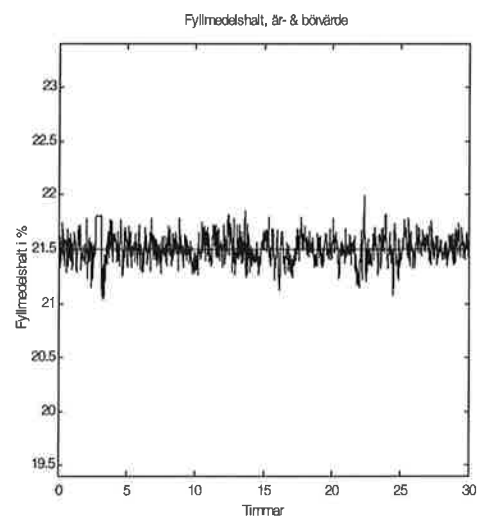
Fyllmedelshalten

Reglerparametrarna för fyllmedelsstyrningen är bara empiriskt förbättrade i brist på riktig processkänedom. Regleringen svarar dock snabbare på störningar och ”bromsar i tid” vid överslängar. De empiriska inställningarna ledde till att fyllmedelsregleringen fick en snabbare dynamik än retentionsstyrningen. Det faktum att dessa två loopar separerades i dynamik är i sig en av flera anledningar till att fyllmedelshalten blivit mer stabil.



Figur 4.10 Verkliga data på fyllmedelsregleringen (a) före och (b) efter.

För att ytterligare bekräfta förbättringen syns i Figur 4.11 data över ett längre tidsperspektiv. Under detta 30-timmarsintervall avviker aldrig fyllmedelshalten mer än 0.5 procentenheter från börvärdet.



Figur 4.11 Verkliga data på fyllmedelsregleringen över ett 30 timmars intervall.

$ISE_{\text{FÖRE}} : 0.203.$ $2\sigma : 0.901 (21.5)$

$ISE_{\text{EFTER}} : 0.019.$ $2\sigma : 0.276 (21.5)$

5. UTVÄRDERING

5.1 Upptäckter

Samspel mellan förtork och eftertork

Vattenreduktionen i torkpartiet domineras av förtorken. En fuktavvikelse som passerar hela förtorken hinner inte åtgärdas i eftertorken. Den är nämligen gjord för att torka limpålägget. Modellen för att torka både lim och vatten blir annorlunda jämfört med att bara torka lim. Eftertorken tar därför i för lite för att utföra båda uppgifterna. Eftersom fukthalt vid pope är kvalitetsmättet och det som syns utåt är ett bra samspel mellan förtork och eftertork väsentligt. Bra torkning av limpålägget kräver att förtorken reducerar de fuktvariationer som orsakas av vatten.

Framkoppling

För att torken skall hinna parera snabba fuktändringar finns en framkoppling från mäldflödet i Measurexsystemet. Den skall verka för att öka trycket i torkcylindrarna när mäldflödet ökar. Som systemet är konstruerat verkar denna framkoppling bara på eftertorken. Det skulle i princip vara möjligt att åtgärda fuktvariationer i eftertorken som orsakas av vatten men eftersom eftertorkens primära uppgift är att torka limpålägget har den modellerats för att i första hand reglera torkningen av limmet. Eftersom identifieringen av eftertorken är baserad på detta resonemag klarar den inte samtidigt att parera variationer i den inkommande fukthalten. Framkopplingen borde därför vara ansluten till förtorken som är avsedd för ändamålet och kapabel att utföra uppgiften.

Avbrott

När regleringen av fukthalt vid limpress, fukthalt vid pope och ytvikten startar efter ett avbrott uppstår en ovanlig driftsituation. Antag att fukthalten vid limpress och fukthalt vid pope under avbrott har sjunkit (för torrt) och att de är långt ifrån börvärdet. När regleringen startar kommer förtorken att försöka reducera reglerfelet, eftertorken kommer att göra det samma med fukthalt vid pope och ytviktsregulatorn kommer att känna av en minskad ytvikt p.g.a. minskad fukthalt. Förtorken kommer att göra ett bra jobb om inte ytviktsregulatorn tar i för mycket. Detta problem kan hanteras genom att ansluta framkopplingen till förtorken. Eftertorken däremot kommer att tro att limpålägget har minskat och sänker effekten i cylindrarna motsvarande vad som skulle behövas om fukthalt vid limpress låg nära sitt börvärde och hela reglerfelet berodde på limpålägget. I själva verket kommer förtorken att hjälpa eftertorken utan att eftertorken är medveten om det. Detta leder till att fukthalt vid pope får en översläng. Ett sätt att komma ifrån detta är att låta förtorken reglera in sig innan man startar regleringen av fukt pope och ytvikt. Tester har visat att man undviker översläng i ett sånt handhavande. Planer finns därför att

införa en automatik som startar regleringen av förtorken så fort det finns papper vid limpressramen. Eftertorken behöver då i de flesta fall aldrig parera en fuktstörning orsakad av vatten och översläng undvikas.

Samplingshastighet

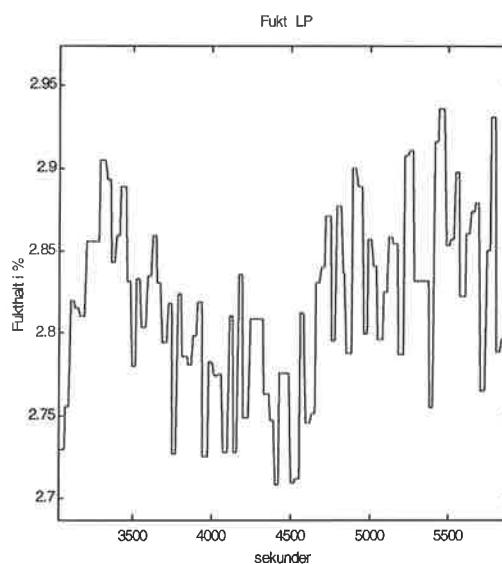
Med tanke på processernas tidskonstanter är samplingstiderna i systemet i längsta laget. Tiden mellan varje nytt sampel begränsas av mätramarnas hastighet över banan. Limpressramen lämnar ett nytt värde när scannern har passerat över hela banbredden vilket motsvarar ungefär var 30:e sekund när mätramen traverserar över hela banbredden. I Measurex system finns även alternativet att plocka ut värden 5 gånger per traversering. Detta kräver dock att tvärsprofilen är jämn. Annars uppfattas olika nivåer längs profilen som längsvariationer vilket kanske inte är fallet. När det gäller limpressramen så används den bara för att mäta fukthalten i papperets längsriktning. Vid avbrott används den ibland också för att undersöka profilen. Det är därför möjligt att låta mät huvudet bara traversera någon meter fram och tillbaka mellan två fasta positioner på ett lämpligt ställe efter banbredden. Mätramen lämnar då värden oftare vilket ger snabbare exekveringen av regulatorn. Under en sådan traversering erhålles ingen profilbild av pappersbanan. Planer finns att ge operatörerna möjlighet att traversera hela bredden för att vid behov se profilen.

En kompromiss som har visat sig fungera bäst under testerna, är att låta mätramen vända innan den har nått bankanten. Denna metod används och förklarar därmed valet av dödtidskorrektur i styrsystemet. Man försummar då de yttersta 10 procenten av banbredden på varje sida men man erhåller profilbild av 80% av banan. Dessutom minskar variationerna i fuktvärdet eftersom bankanterna har en tendens att avvika ganska kraftigt från mätning till mätning utan att fukthalten ändras. Genom att traversera på detta sätt samtidigt som hastigheten på mätramen ökas kunde värden levereras var 20:e sekund. Detta borde ge en bättre reglering.

Mätramen vid pope däremot samlar data även för tvärsregleringen och är därför beroende av kontinuerlig profilinformation.

5.2 Störningar

Limpresramen



Figur 5.1 Data från limpressramens mät huvud som verkar ha dålig repeterbarhet. Variationerna verkar ibland kunna bero på traverseringsriktning.

Variationerna i mätvärdena från limpressramen är stundtals lika stora som variationerna från traversering till traversering. Eftersom mätvärdena återkopplas för fuktregleringen och ligger fasta i ca 20-30 sekunder (beroende på traverseringssätt) hinner fukthalten påverkas negativt om det är falska mätvärden. När ärvärdet varierar alldeles kring börvärdet kommer dessa variationer bara att skapa fuktstörningar eftersom tryckloopen nästan hinner svara under ett "fuktsampel". För att undvika detta har vi infört en hysteres i systemet. När ärvärdet ligger inom hysteresbandet en viss tid används medelvärden av de två senaste mätvärdena istället för verkliga data. Detta skonar även ventilerna för tryckregleringen vilka annars korrigerar ganska kraftigt för varje fuktsampel utan att göra någon nytta. När ärvärdet hamnar utanför används omedelbart de sanna värdena.

Kvalitétsskretsarna

Under antagandet att dynamiken för kvalitétsskretsarna kan approximeras med en modell av första ordningen, gäller känslighetsfunktionerna i figur 4.5, 7, 9. De visar att regulatorn kan dämpa störningar med frekvenser lägre än brytfrekvensen. Störningar med högre frekvenser kan regulatorn inte parera. För kretsarna ytvikt, förtork och eftertork är skärningsfrekvenserna ca 0.01 rad/sek vilket motsvarar en periodtid på ca 10 min. Om sådana störningar förekommer måste de lokaliseras och om möjligt elimineras.

Snabba störningar uppstår exempelvis när vakuumlådorna intar ett sådant driftläge att de självsvänger. Detta inträffar då och då. Mäldlimsaggregatet har en vattenspädning som

ibland av okänd anledning självsvängningar, detta har stor inverkan på retentionen och stör både ytvikt, fyllmedelshalt och fukthalt. Generellt gäller att dessa snabba störningar uppstår efter inloppslådan. I virapartiet kan dåligt inställda regleringar orsaka mycket snabba störningar eftersom de verkar direkt på det som kan ses som nästan färdigt papper. Före virapartiet i maskinens längsriktning finns det sådan tröghet i systemet att snabba störningar automatiskt utjämnas av de fysikaliska mekanismerna.

5.3 Tryckgruppernas dynamik

I samband med inställning av torkcylindrarnas tryckreglering tilldelades samma dynamik för grupperna 3 och 4 resp. grupperna 6:övre och 6:undre. Detta för att grupperna i förtork resp. eftertork skall uppträda dynamiskt lika. Ångtrycksgrupperna skall ständigt ställa in sig efter nya börvärden och bör vara lika snabba. För 6:e grupperna är det speciellt viktigt eftersom man sätter en fast absolut tryckskillnad grupperna mellan för att papperet inte skall vrida sig eller som det heter, få en önskad curl.

5.4 Förslag till fortsättning

De åtgärder som gjorts under detta examensarbete har i stor utsträckning förbättrat maskinstyrningen. Pga examensarbetets begränsade omfattning finns det möjligheter till ytterligare förbättringar.

Hastighetskompensering

Operatörerna kan ändra maskinhastigheten för att hålla den önskade produktionen av papper. Processmodellerna som är framtagna baseras på en maskinhastighet kring 920 m/min. I Measurexsystemet finns det ett program som kompenserar processmodellerna vid hastighetsändring. För att aktivera den funktionen måste man först bestämma hur processernas dynamik beror av hastigheten. Detta kräver att regleringarna av alla kvalitetsloopar ställs i manuellt läge samtidigt som man ändrar maskinhastigheten. När hastighetsändringen är utförd väntar man tills alla förändringar i fukt, ytvikt och fyllmedelshalt har klingat ut och avgör utifrån dessa kompenseringsfaktorerna. Alla berörda modeller kommer sedan att kompenseras utifrån dessa faktorer och den nominella hastigheten.

Ångstammen

Tryckregleringen klarar nu bättre av att parera störningar från tryckvariationer i ångstammen. Detta ständiga kompenserande sliter mycket på ventilerna. Ett stabilare ångtryck på stammen skulle skona ventilerna och drastiskt förlänga deras livslängd.

Fler identifieringar

Processmodellerna som tagits fram i detta examensarbete gäller för papper med ytvikten 80 g/m^2 . För att undersöka modellernas samhörighet med verkligheten även för 70 och 100 grams papper bör liknande undersökningar göras för dessa kvalitéter. Rent intuitivt bör ett tunnare papper torka snabbare än ett tjockare för samma maskinhastighet och ångtryck. Enligt detta resonemang borde ett 70 grams papper få en högre processförstärkning än ett 80 grams. Så är måhända inte fallet men det bör undersökas för optimal maskinstyrning.

Vakuumpartiet

De flesta störningarna på kvalitetsstorheterna som ligger inom det frekvensområde där regleringen inte klarar av att dämpa kommer från vakuumpartiet. Vakuumpartiet består av ett flertal tryckregleringar som var för sig skall hålla sina börvärden i vakuumsugarna. Dessa självsvängningar i vissa driftslägen. Någon form av processidentifiering för vakuumpartiet vore bra för att undvika snabba störningar på kvalitetsstorheterna.

Referenser

- [1] Panagopoulos, H, Åström, K J & Hägglund, T, "The Lambda Method for Tuning PI Controllers.", rapport vid institutionen för reglerteknik vid Lunds tekniska högskola.
- [2] Åström, K J & Hägglund, T, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning.", Instrument Society of America 1995, ISBN 1-55617-516-7.
- [3] Dahlin, E. B., "Designing and Tuning Digital Controllers." Instruments & control Systems - vol 41, 1968, s 77-83.
- [4] Dahlin, E B, Ziemer, R L, Wickstrom, W A, Horner, M G "Designing and Tuning Digital Controllers." Instruments & control Systems - vol 41, 1968, s 87-91.
- [5] Åström, K J & Wittenmark, B, "Computer controlled systems - Theory and design.", Prentice hall information and system sciences series, second edition, ISBN 0-13-172784-2.
- [6] Åström, K J & Wittenmark, B, "Adaptive control.", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., second edition, ISBN 0-201-55866-1.
- [7] Åström, K J, "Reglerteori.", Almqvist & Wiksell Förlag AB, ISBN 91-20-04438-0.
- [8] Åström, K J, "Computer Control of a Paper Machine - an Application of Linear Stochastic Control Theory". IBM J of Res and Dev, (1967).
- [9] Glad, T & Ljung, L, "Reglerteknik - Grundläggande teori." Lund: Studentlitteratur (1989) andra upplagan.
- [10] Lundqvist, A, "Frekvensegenskaper vid långsreglering av pappersmaskiner." Examensarbete, Luleå: Tekniska Högskolan i Luleå (1992).
- [11] Olbjer, L, Holst, U, Holst, J, "Tidsserieanalys." Institutionen för matematisk statistik, Lunds tekniska högskola.

- [12] Dahlberg, K, "Simulering och utvärdering av askhaltsstyrningen på pappersmaskiner." Examensarbete vid STFI, Institutionen för Signaler och System, Avdelningen för Reglerteknik, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm, 1993.
- [13] Hagberg, M, Isaksson, A, "A paper Machine Benchmark for Control Systems 94.", STFI, Institutionen för Signaler och System, Avdelningen för Reglerteknik, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm.

Bilaga 1

Massbalansekvationer

$$\frac{dM}{dt} = M_{in} - M_{ut}$$
$$M = VC$$

Viratråget

Viratråget fungerar som en uppsamlare för viragropen och modelleras som en tank med ideal blandning.

$$V_{vt} \frac{d}{dt}(C_{fib_{vt}}(t)) = Q_{vpvt} C_{fib_{vpvt}}(t) - Q_{vtvg} C_{fib_{vt}}(t)$$

$$V_{vt} \frac{d}{dt}(C_{fyllm_{vt}}(t)) = Q_{vpvt} C_{fyllm_{vpvt}}(t) - Q_{vtvg} C_{fyllm_{vt}}(t)$$

där

V_{vt} = Vätskevolymen i viratråget.

$C_{fib_{vt}}$ = Fiberkoncentrationen ut ur viratråget.

$C_{fyllm_{vt}}$ = Fyllmedelskoncentrationen ut ur viratråget.

$C_{fib_{vpvt}}$ = Fiberkoncentrationen i flödet från virapartiet till viratråget.

$C_{fyllm_{vpvt}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i flödet från virapartiet till viratråget.

Q_{vpvt} = Flödet från virapartiet till viratråget.

Q_{vtvg} = Flödet från viratråget till viragropen.

Viragropen

Modellen för viragropen förenklas genom att anta att det enda inflödet som blandas är flödet från viratråget. De andra återcirkulationerna samt huvudflödet från fyllmedel och tjockmassa antas inte blanda sig med viragropens vätskevolym. Dessa insignaler behandlas därför i modellen för blandningspumpen.

$$V_{vg} \frac{d}{dt}(C_{fib_{vg}}(t)) = Q_{vtvg} C_{fib_{vt}}(t) - (Q_{vgbp} + Q_{vgft}) C_{fib_{vg}}(t)$$

$$V_{vg} \frac{d}{dt}(C_{fyllm_{vg}}(t)) = Q_{vtvg} C_{fyllm_{vt}}(t) - (Q_{vgbp} + Q_{vgft}) C_{fyllm_{vg}}(t)$$

där

V_{vg} = Vätskevolymen i viratråget.

$C_{fib_{vg}}$ = Fiberkoncentrationen i viragropen.

$C_{fyllm_{vg}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i viragropen.

$C_{fib_{vt}}$ = Fiberkoncentrationen i viratråget.

$C_{fyllm_{vt}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i viratråget.

Q_{vtvg} = Flödet från viratråget till viragropen.

Q_{vgbp} = Flödet från viragropen till blandningspumpen.

Q_{vgft} = Flödet från viragropen till filtreringen

Blandningspumpen

$$M_{ut} = M_{in}$$

$$Q_{bpf} C_{fib_{bp}} = Q_{rfbp} C_{fib_{rf}} + Q_{debp} C_{fib_{de}} + Q_{ilbp} C_{fib_{il}} + Q_{vgbp} C_{fib_{vg}} + Q_{tmbp} C_{fib_{tm}}$$

$$Q_{bpf} C_{fyllm_{bp}} = Q_{rfbp} C_{fyllm_{rf}} + Q_{debp} C_{fyllm_{de}} + Q_{ilbp} C_{fyllm_{il}} + Q_{vgbp} C_{fyllm_{vg}} + Q_{tvbp} C_{fyllm_{tm}} \\ + Q_{fvbp} C_{fyllm_{fm}}$$

där

$C_{fib_{bp}}$ = Fiberkoncentrationen i blandningspumpen.

$C_{fib_{rf}}$ = Fiberkoncentrationen i rejektet från filtreringen.

$C_{fib_{de}}$ = Fiberkoncentrationen i överlöpet från dekulatorn.

$C_{fib_{il}}$ = Fiberkoncentrationen i överlöpet från inloppslådan.

$C_{fib_{vg}}$ = Fiberkoncentrationen i viragropen.

$C_{fib_{tm}}$ = Fiberkoncentrationen i tjockmassan.

$C_{fyllm_{bp}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i blandningspumpen.

$C_{fyllm_{rf}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i rejektet från filtreringen.

$C_{fyllm_{de}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i överlöpet från dekulatorn.

$C_{fyllm_{il}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i överlöpet från inloppslådan.

$C_{fyllm_{vg}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i viragropen.

$C_{fyllm_{tm}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i tjockmassan.

$C_{fyllm_{fm}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i fyllmedlet.

Q_{bpf} = Flödet från blandningspumpen till filtreringen.

Q_{rfbp} = Flödet från filtreringsrejektet till blandningspumpen.

Q_{debp} = Flödet från dekulatorns överlöp till blandningspumpen.

Q_{ilbp} = Flödet från inloppslådans överlöp till blandningspumpen.

Q_{vgbp} = Flödet från viragropen till blandningspumpen.

Q_{tvbp} = Flödet från tjockmassaventilen till blandningspumpen.

Q_{fvbp} = Flödet från fyllmedelsventilen till blandningspumpen.

Inloppslådan

$$V_{il} \frac{d}{dt}(C_{fib_{il}}(t)) = Q_{f_{il}} C_{fib_{ft}}(t) - (Q_{ilvp} + Q_{ilde} + Q_{ilbp}) C_{fib_{il}}(t)$$

$$V_{il} \frac{d}{dt}(C_{fyllm_{il}}(t)) = Q_{f_{il}} C_{fyllm_{ft}}(t) - (Q_{ilvp} + Q_{ilde} + Q_{ilbp}) C_{fyllm_{il}}(t)$$

där

V_{il} = Vätskevolymen i inloppslådan.

$C_{fib_{il}}$ = Fiberkoncentrationen i inloppslådan.

$C_{fib_{ft}}$ = Fiberkoncentrationen från filtreringen.

$C_{fyllm_{il}}$ = Fyllmedelskoncentrationen i inloppslådan.

$C_{fyllm_{ft}}$ = Fyllmedelskoncentrationen från filtreringen.

$Q_{f_{il}}$ = Flödet från filtreringen till inloppslådan.

Q_{ilvp} = Flödet från inloppslådan ut på virapartiet.

Q_{ilde} = Flödet från inloppslådan till dekulatorm.

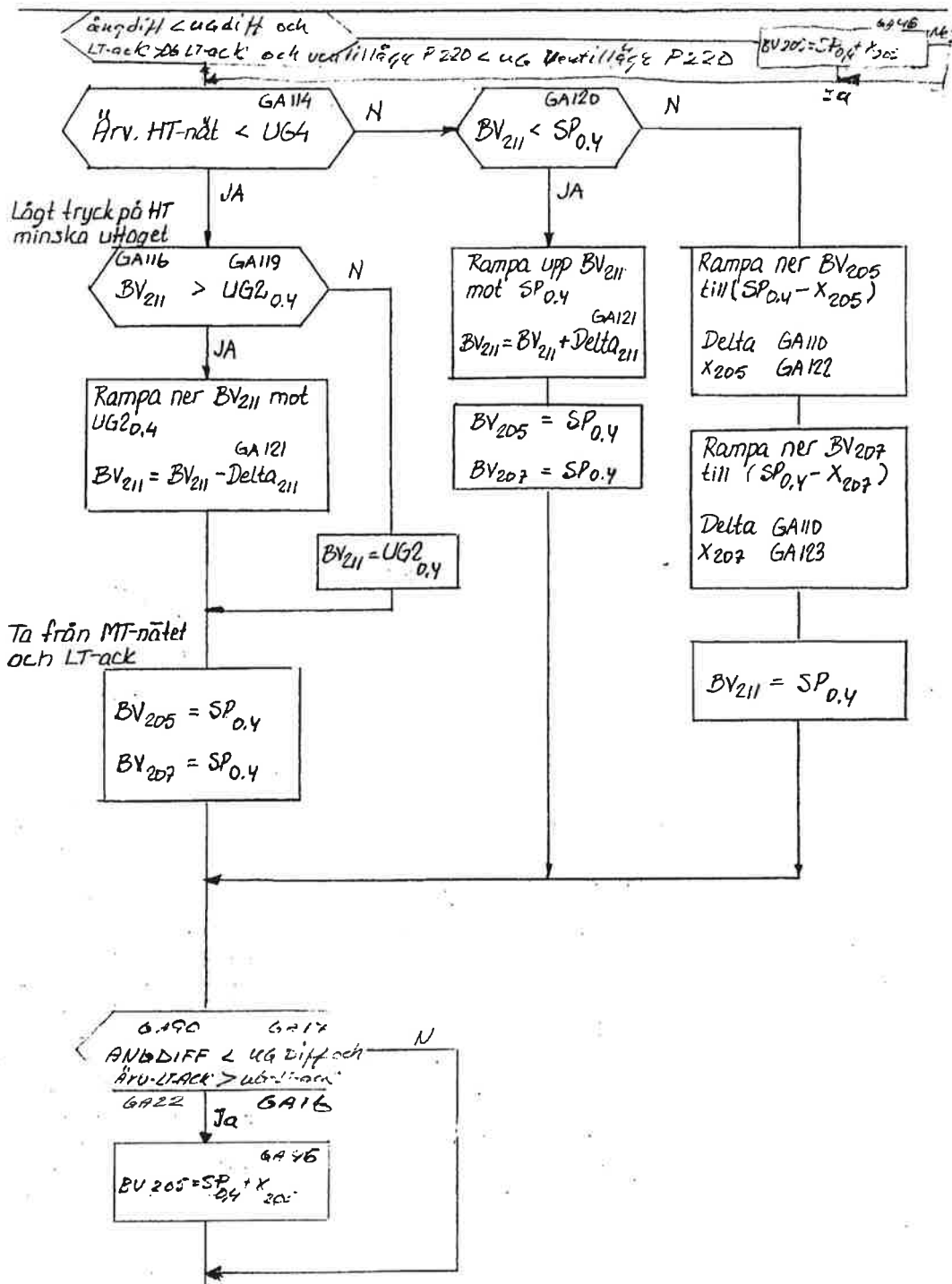
Q_{ilbp} = Flödet från inloppslådans överlöp till blandningspumpen.

Förenkling

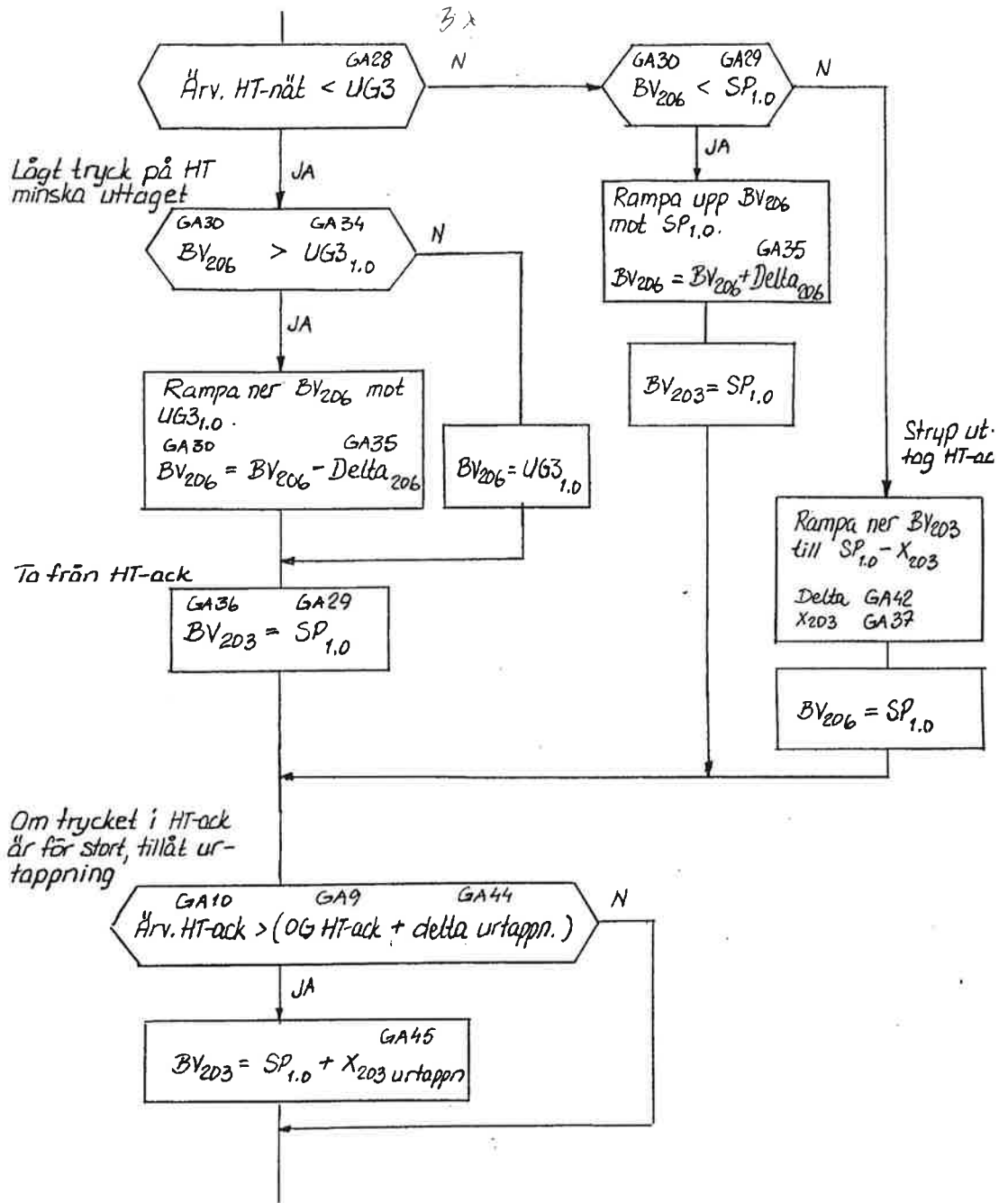
Modellen för ytviktens och fyllmedelhaltens beteende kan ses som ganska komplex. Dessbättre består tyngdpunkten i dynamiken av inloppslådan. Eftersom mäldflödet nästan inte blandas med resten av volymen i viragropen och dessutom har en väldigt stor retention går det bra att approximera modellen som en första ordningens process med dödtid. Fyllmedelshalten däremot har en mindre retention och blandningsutjämnas därmed kraftigare i viragropen. Measurex modellerar ändå processen som en första ordningens, detta kräver dock en väl fungerande retentionsmedelsstyrning.

Bilaga 2

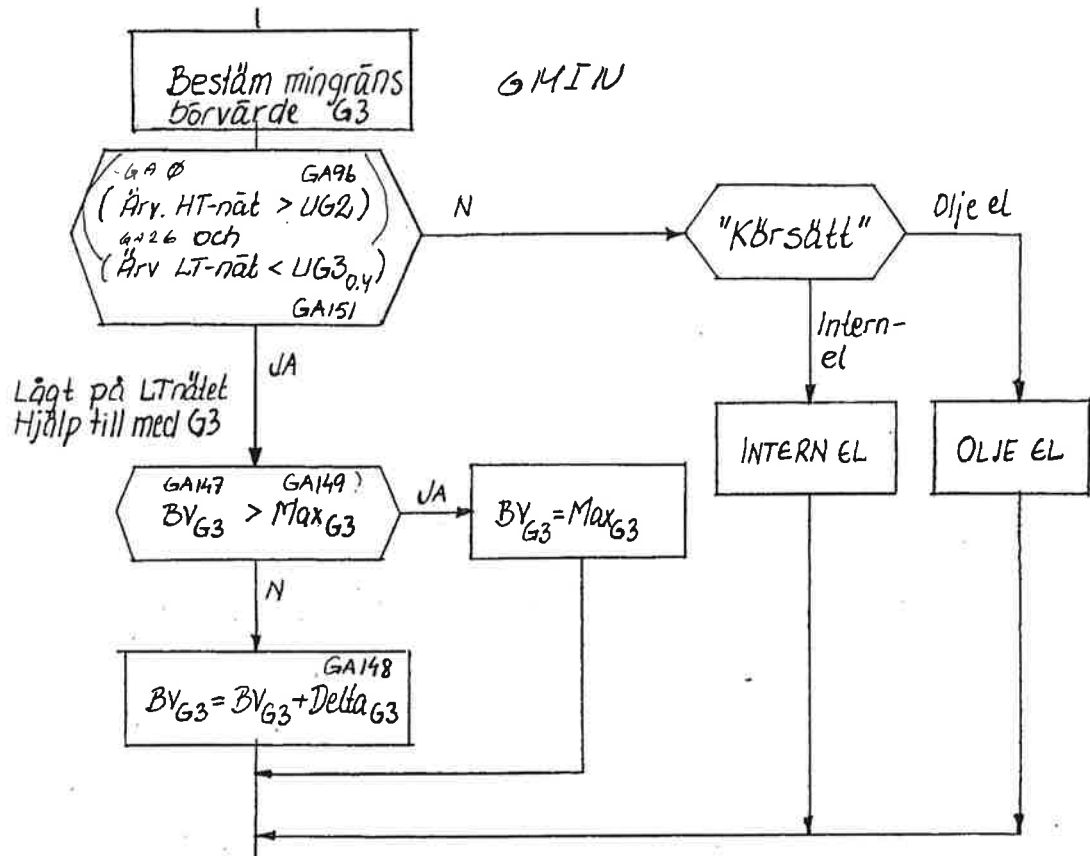
Styrning av LT-nätet



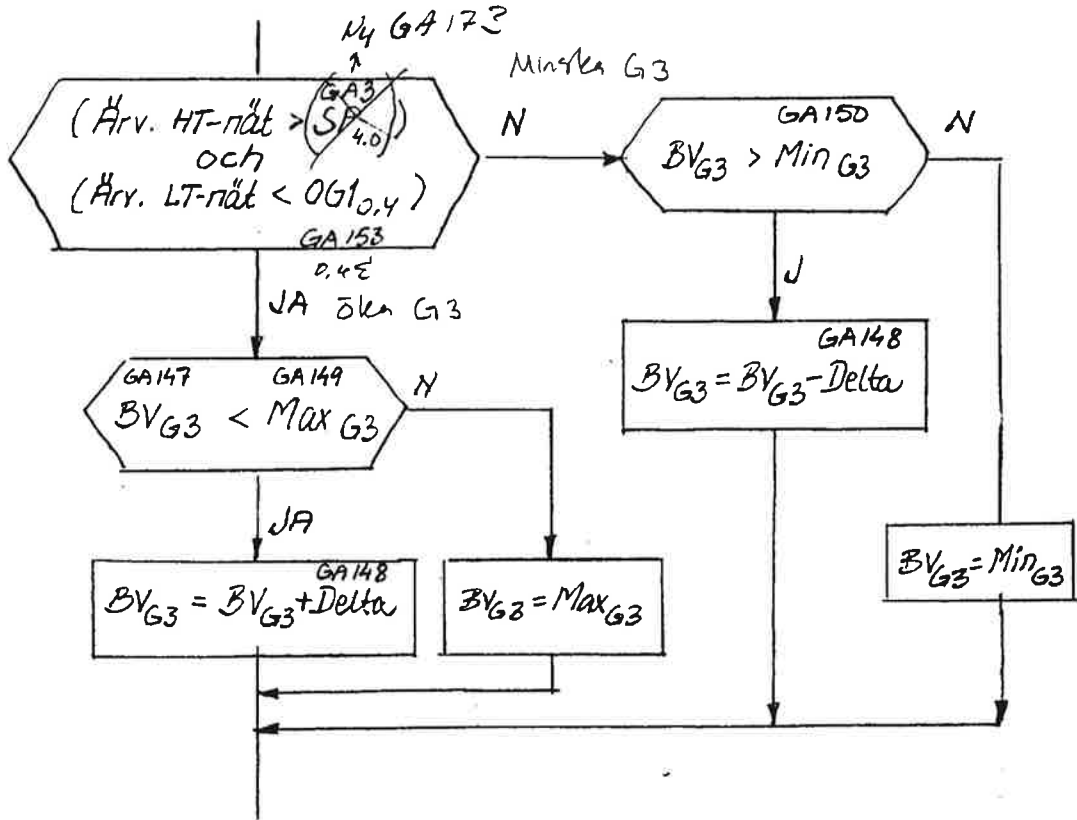
Styrning av MT-nätet



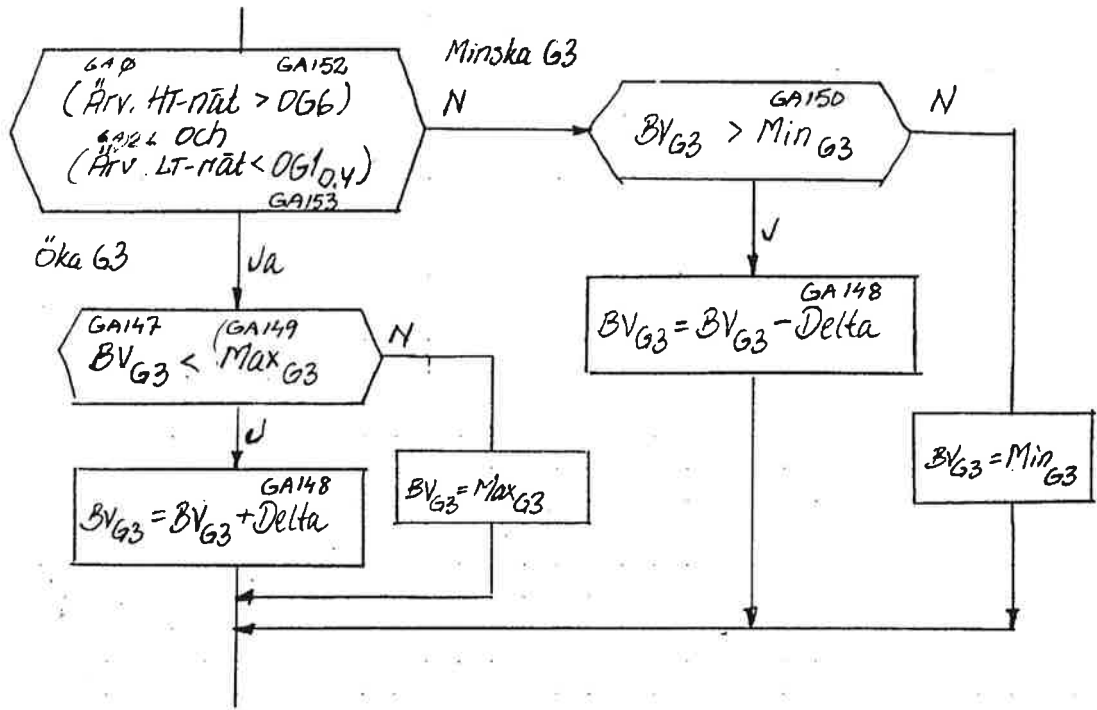
Styrning av ångturbin



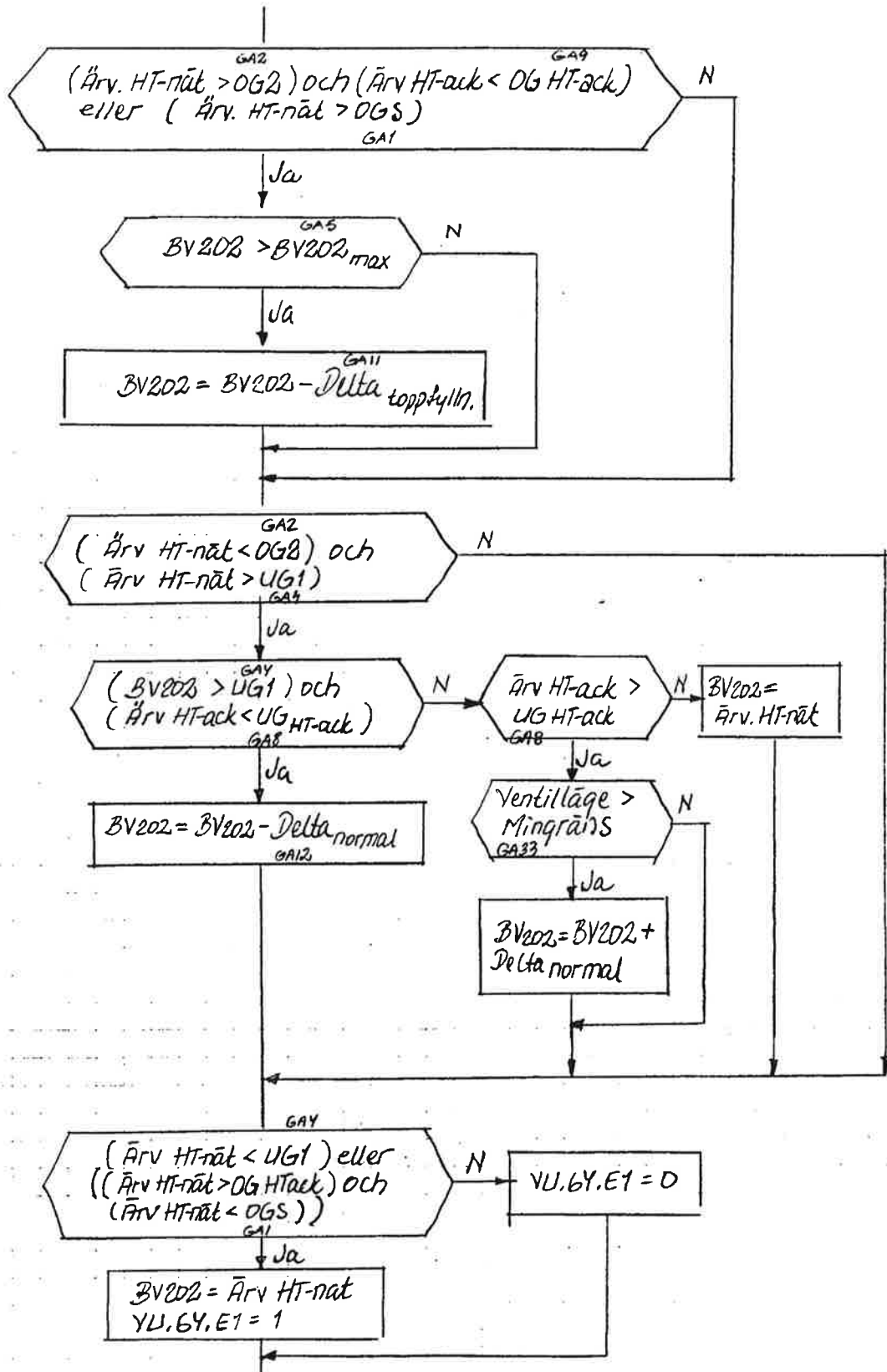
Körsätt "OLJE EL"



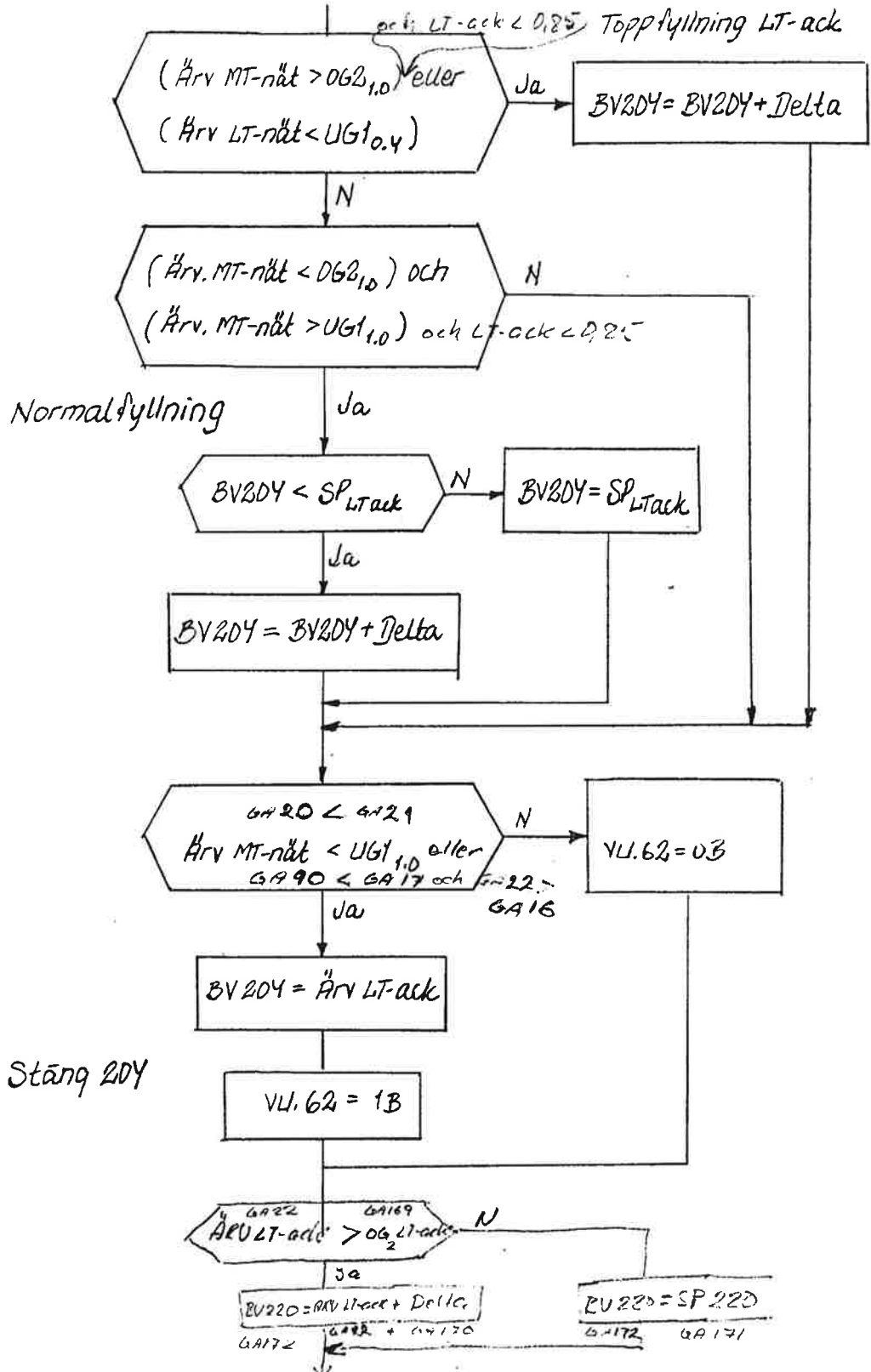
Körsätt "INTERN EL"



Fyllning av HT-ackumulatorn



Fyllning av LT-ackumulatorn



Styrning av säkerhetsventiler

