

Automatisk reglering av färgnyans på pappret i en pappersmaskin

Per Johnsson



LUNDS
UNIVERSITET

Institutionen för Reglerteknik

MSc Thesis
ISRN LUTFD2/TFRT--5962--SE
ISSN 0280-5316

Department of Automatic Control
Lund University
Box 118
SE-221 00 LUND
Sweden

© 2015 by Per Johnsson. All rights reserved.
Printed in Sweden by Media-Tryck
Lund 2015

Abstract

This paper deals with design and implementation of a regulator to control the tint of the paper on Stora Enso Nymölla AB's paper machines. The paper industry is a major industrial area in Sweden with continuous processes running around the clock with as short downtime as possible, which places special demands on the running and testing of controllers. The paper machine is in many cases the bottleneck of production so small improvements often have great effect. To improve the overall efficiency of the paper machine a regulator has been made to reduce the downtime at grade changes. The controller is designed for programmable logic controllers in Metso DNA system's fbCAD and a GUI has been designed for the machine operators. Tests on the paper machines show that an Otto-Smith predictor and associated controller can make grade changes significantly shorter with the result that less paper must be discarded than with the previous manual control strategy. A sufficient number of tests to ensure statistically how much the downtime decreases have not been made but the few that have been made show a decrease of downtime by 50 % at color grade changes compared to when they are done manually.

Tillkännagivanden

Under de två första somrarna efter att jag börjat på LTH sommarjobbade jag på Stora Enso Nymölla och det var där jag kom i kontakt med pappersmaskinerna. Efter att själv ha spenderat många långa nätter i operatörskuren vill jag börja med att speciellt tacka Jonas Olofsson och de andra på A-skiftet, utan vars svar på frågor om hur allt möjligt på en pappersmaskin fungerar jag aldrig skulle ha kommit på tanken att just göra en färgregulator till pappersmaskinerna. Även under själva examensarbetet var det värdefullt att kunna fråga och bolla idéer med Jonas. Jag vill även rikta ett speciellt tack till min handledare på Nymölla, Olle S. Svensson som från början trodde på idén att göra en automatisk färgreglering, styrde mig rätt när jag tvekade på genomförbarheten och som tillsammans med Lars-Helge Vestesson, som också förtjänar ett stort tack, hjälpt mig att lära mig de interna systemen och programmeringen som behövdes för att implementera regulatören. Under själva inkörningen och testningen av regulatören var det ovärderligt med de maskinförare som från början trodde på att det skulle gå och jag vill bland dem speciellt tacka A- och E-skiftet och däribland speciellt Martin, maskinförare på E-skiftet, som hjälpt till att testa regulatören även när jag inte kunde vara på plats. Slutligen vill jag på institutionen för reglerteknik på LTH tacka min handledare, Tore Hägglund som trott på mig, gett mig stöd och idéer samt min bror Ola Johnsson som i slutskedet hjälpte till att ge idéer om rapportens utformning.

Innehåll

1. Introduktion	9
2. Metod	10
3. Bakgrund	11
3.1 Färger	11
3.2 Processbeskrivning	12
3.3 Störningar	15
3.4 Ekonomiska aspekter	15
4. Regulatordesign	17
4.1 Utrustningsuppställning	17
4.2 Modell	18
4.3 Observerare	20
4.4 Förstärkning	21
4.5 Beräkning av processparametrar	22
4.6 Stabilitet	27
4.7 Börvärdeshanterare	28
5. Användargränssnitt	34
6. Resultat och utvärdering	37
7. Diskussion och framtida utvecklingsmöjligheter	39
Litteratur	41

1

Introduktion

Pappersindustrin är en av Sveriges basindustrier och utveckling görs hela tiden för att förbättra och effektivisera tillverkningen av papper. För att effektivisera tillverkningen finns flera tillvägagångssätt, att öka produktionen med befintlig utrustning utan att höja kostnaderna är mycket önskvärt. Att öka tiden för produktion genom att minska nertiden är den ingång till effektivisering som detta examensarbete inriktats på.

Detta examensarbete behandlar utveckling och implementering av en regulator för att styra nyansen på pappret som tillverkas på Nymölla pappersbruk och därigenom minska kvalitetsomställningstiderna. Till regulatormen hör även ett grafiskt användargränssnitt så att pappersmaskinernas maskinförare kan använda sig av regulatormen. Själva processen är en med flera minuters dödtid och tidskonstanter större än så och för att lösa själva reglerproblemet används därför en Otto-Smith-prediktor tillsammans med en för ändamålet designad regulator.

Färgregleringen är en liten del i det stora komplexa system som ett pappersbruk utgör. Hundratals faktorer påverkar papperskvaliteten och färgen är en av många parametrar som måste uppfylla uppsatta krav. Att avlasta maskinförarna är därför inte ointressant samtidigt som det är viktigt att regulatormen är helt bakåtkompatibel och att regleringen kan slås på och av utan problem.

2

Metod

För att utveckla regulatorn undersöktes först hur regleringen av färgerna görs när de styrs manuellt, vilka värden och trender maskinförarna använder sig av och vilka färger som används och vilka instruktioner som fanns till maskinförarna för att styra färgen. Sedan gjordes en enkel modell av systemet i MATLABs Simulink, experiment gjordes med de approximativt kända stegsvaren och olika regulatorstrukturer samt för att undersöka vad som händer när prediktorns modell skiljer sig från processens.

När en regulatorstruktur som fungerade bra i Simulink var framtagen implementerades denna i Nymöllas system där den kunde felsökas med riktiga variabelvärden innan ett användargränssnitt för operatörerna utvecklades. När detta var gjort utvärderades den och testades och nya funktioner lades till och förstärkningen justerades.

För att maskinförarna skulle känna sig bekväma med att använda regulatorn har förutom driftinstruktioner även handledning getts i hur regulatorn är tänkt att hanteras och fungera vid vanlig drift såväl som vid omställningar och driftavbrott vid olika störningar, delvis beroende på vad som hänt när de olika skiften handletts.

I rapporten förklaras först bakgrunden till arbetet och vilka vinster som kan förväntas varefter själva färgrummet som färgerna mäts i förklaras. Själva pappersmaskinen förklaras kort och en mer ingående förklaring av hur färgerna tillsätts och hur nyansen på pappret sedan mäts görs.

Därefter förklaras valet av regulator, hur processmodellen tagits fram och hur förstärkningen valts. Specialfunktioner som gjorts för ändring av börvärden förklaras och användargränssnittet presenteras och förklaras. Därefter följer ett stycke om stabiliteten och vilken inverkan olika fel i modellen bör ha på regulatorns funktion och sedan hur regulatorn faktiskt fungerar och vilka vinster som går att observera.

Till sist diskuteras utvecklingspotential, vad som borde vara huvudfokus vid eventuell vidare utveckling och vilken grad av förbättring som går att uppnå jämfört med den aktuella regulatorn.

3

Bakgrund

På pappersbruket finns det sedan tidigare en relativt avancerad regulator för färgreglering som provats men då denna varit väldigt långsam vid stegändringar i samband med kvalitetsomställningar har den inte använts. Att ha en automatisk styrning har tidigare inte bedömts som möjligt av bruket, men mätramén som mäter papprets färg online har under de senaste åren uppgraderats till en modell som ger betydligt säkrare resultat och efter det har möjligheten att använda automatisk reglering inte undersökts ordentligt.

Regleringen av färgen sker idag huvudsakligen med hjälp av recept för vilken tillförsel som användes då aktuell kvalitet tidigare producerats. Om färgkoncentrationen ska minskas mycket sätts i vissa fall styrsignalen initialt till ett värde under receptets börvärde för att göra omställningen snabbare men i normalfallet ställs receptets föreslagna färgkoncentration in som flöde lite före den föregående kvalitén är klar vilket ger en relativt långsam förändring.

Det finns två olika pappersmaskiner på Nymölla, vilka kvalitéter som tillverkas på de olika maskinerna skiljer sig. Vissa kvalitéter tillverkas på båda men användningen av färger skiljer sig mellan de båda. Den ena använder t.ex. tre nyansfärger för vissa kvalitéter vilket inte förekommer på den andra. Delvis krävs därför olika lösningar för de olika maskinerna.

3.1 Färger

Ögat ser olika färger beroende på vilka våglängder ljuset som når ögat har. Olika nyansfärger som tillsätts till pappret absorberar olika delar av spektrumet och när en våglängd absorberas syns bara de andra färgerna. När ett färgmedel används sänds alltså inte mer ljus av de våglängderna som färgen ser ut att ha utan det är istället de andra våglängderna som minskar. Det finns dock medel som absorberar ljus av en våglängd och sedan sänder ut dem som en annan våglängd. Vid papperstillverkning används ett sådant medel, kallat optiskt vitt, även kallat OBA (Optical Brightening Agent) som absorberar UV-ljus och sänder ut det som synligt ljus, vilket används för att göra pappret ljusare.

För att mäta vilken färg eller nyans något har kan mätningar göras på flera olika sätt, beroende på från vilken vinkel man mäter förändras resultatet och två färger som ser exakt lika ut ur en vinkel kan vara olika i en annan vilket kallas att de är metameriska [*Instruction manual for Metso IQ Color MD Control* 2012].

Det finns flera olika system för att mäta och klassificera färger och det som används av Nymölla för att definiera nyanserna på pappret är det så kallade CIELAB-systemet. Med det uttrycks den uppmätta färgen i tre olika värden, L^* , a^* och b^* . L^* står för hur ljus pappret är, a^* står för var det är mellan grönt och rött och b^* står för var mellan gult och blått färgen är.

Problemet med att mäta och reglera färgen reduceras alltså till tre dimensioner med hjälp av CIELAB-systemet. Två färger som har samma CIELAB-värden kan ge olika spektrumsvar men skillnader av denna typ är inte intressanta för detta examensarbetet då det bara är CIELAB-värdena som finns med i kvalitetskraven för pappret på Nymölla.

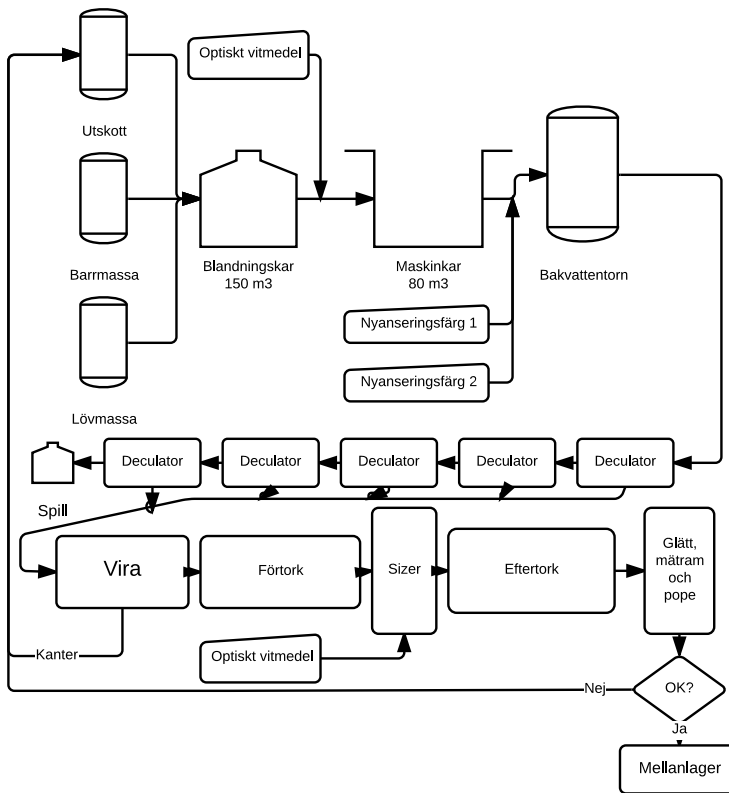
Vithet

Det är i CIELAB-systemet som operatörerna kan studera trender och i vilket gränserna för när pappret är godkänt eller måste kasseras finns. En av de viktigaste kassationsgränserna är att papprets vithet inte får vara för långt utanför dess gränser. Själva vitheten kan uttryckas som en funktion av L^* -, a^* - och b^* -värdet och vitheten blir högre då spektrumsvärdet är jämnt mellan de olika spektrumvåglängderna.

3.2 Processbeskrivning

Pappersmaskinens främsta uppgift är att torka bort vatten från pappersmassa. De flesta papperskvaliteter består av flera olika typer av massa, dels av olika löv- och barmassor och dels av tidigare kasserat papper, kallat utskott. På Nymölla blandas de olika massorna i ett stort blandningskar innan den blandade massan pumpas till maskinkaret varifrån det sedan pumpas genom ett bakvattentorn och sedan till fem olika deculatorsteg seriekopplade med varandra, för att koka bort luft från massan, där det från varje steg går massa till pappersmaskinens vira. Viran är en perforerad ändlös duk av plast. När pappersmassan är på viran sugs först vatten bort, trycks bort när det passerar genom valsar och torkas sedan bort i en för- och en efterverk, mellan torkarna stryks lim med optiskt vitmedel på papprets virasida. Tillförseln här har som främsta syfte att balansera upp så att båda sidorna blir lika ljusa då det optiska vitmedlet främst lägger sig på den andra sidan av pappret på viran. I figur 3.1 kan de övergripande stegen i papperstillverkningen ses. Stegen där pappersmassan mestadels består av vatten, fram till viran, kallas maskinens våtända och stegen efter torkarna kallas torrändan.

Genom bakvattentornet går en ledning med hål i för att massan ska dra till sig mer vatten utan att någon blandning sker i tornet varför tornet inte är med i den matematiska modellen av systemet. Deculatorerna håller en så låg volym att även



Figur 3.1 Flödesschema av en pappersmaskin.

deras tidskonstanter har försumrats i den matematiska modellen. Efter eftertorken kommer glätten och den mätram som mäter fägen på pappret. Glätten består av en varm stålvals och en gummivals som pappret passerar igenom för att minska ytråheten. Allra sist rullas pappret upp till en papperstambour på ett tambourjärn (kallat tomjärn eftersom det inte är något papper på det) som ligger mot popecylindern (härefter kallad popen). Det tomma tambourjärnet väger i sig cirka sex ton och en full rulle har även ca 24 ton papper på sig som när den är färdig lyfts bort med en traverskran.

Färgstyrning

För att styra papprets nyans används en eller två olika nyansfärger plus optiskt vitmedel. När bara en nyansfärg används finns det inte något börvärde för a^* eftersom det inte går att fritt styra till ett tredimensionellt värde med endast två styrsignaler.

Vid tillverkningen av vissa kvalitéer på den ena pappersmaskinen (PM1) an-

vänds en tredje nyansfärg för att få en mer tidsbestående färg på pappret. Den tredje nyansfärgen har ett stegsvar i $L^*a^*b^*$ -planet som är likt det för nyansfärg 1 som är den som används mest. När den sätts in ersätter den därför delvis nyansfärg 1. Nyansfärg 3 används inte för att styra färgen rätt utan färgmängden är helt styrd av recept vilket gör att frihetsgraderna i regleringen inte ökar när den tredje nyansfärgen tillsätts.

Färgtillsättning

Nyansfärgerna och optiskt vitt tillsätts till pappersmassan på olika ställen, nyansfärgerna tillsätts efter maskinkaret och precis innan filtrena medan optiskt vitt tillsätts innan maskinkaret och har därför en mycket större tidskonstant än vad nyansfärgerna har, se figur 3.1.

Mätningar

För att mäta om pappret är godkänt eller om det måste kasseras görs mätningar i labb efter att pappersrullarna är tillverkade, vilket alltså görs offline. För att hjälpa operatörerna att reglera finns även en onlinemätare som traverserar över pappersbanan när pappret tillverkas. Mätningarna från denna ger inte riktigt samma resultat som den i labbet då mätningarna görs på olika sätt. Flera faktorer skiljer mätningarna från varandra och bland annat görs vissa av mätningarna på pappret i labbet på en hög bildad av pappersark från de olika delarna av pappersbredden, vilket inte görs online. Pappret har dessutom inte samma fuktighet när det mäts online som det har när det senare kommer till labbet vilket även det påverkar.

Offline-mätning När en färdig paperstambour är tillverkad tas det prover på den som analyseras i ett speciellt labb. När en tambour är färdig tas först de yttersta lagrena papper bort och sedan rivs det prover längs med hela tambourens längd. Dessa proverna analyseras sedan i labbet genom att dels undersöka det reflekterade spektrumet för några av de olika tamboursegmenten enskilt och dels genom att reflektionsspektrumet för hela högen av prover från aktuell tambour mäts. Båda sidorna av pappret undersöks här. Eftersom mätningarna görs manuellt tar det några minuter från det att pappret är färdigt tills det att mätningen kommer in. Mätvärdena för mätrens sista traversering över pappersbanan innan skiftet av tambour sparas därför så att systemet vet när de uppmätta värdena gällde så att mätrens onlinemätning kan kompenseras och kalibreras av mätvärdena från labbet.

I dagsläget är det inte riktigt varje tambour som blir testad utan det är främst efter kvalitetsomställningar som varje tambour testas och när färgen verkar vara stabil testas ungefär varannan tambour.

Vid omställningar kan papper tas direkt från maskinens pope för att analyseras i labbet. På så sätt kan det relativt snabbt undersökas om pappret är godkänt eller ej redan innan pappersbanan blåses upp på ett tomjärnet med tryckluft ifrån popecy-linden. Ett vanligt tillvägagångssätt vid omställningar är att när den förra kvalitén är färdigkörd bryts pappersbanan vid popen så att pappersbanan går direkt till en pap-

persupplösare för återvinning. När omställningen sedan närmar sig sitt slut blåses pappersbanan, med tryckluft, av från popecylindern och upp på ett tomjärn så att de sista 2000-3000 metrarna av omställningen kommer på en egen rulle som papper kan tas ifrån, så att en kalibrering kan göras.

Online-mätning Onlinemätningen av papper sker genom att en mätram med mätutrustning traverserar över pappersbanan fram och tillbaka när pappret tillverkas. Det mätta området bildar alltså ett zick-zack-mönster på pappret. Kanterna av pappersbanan mäts inte eftersom pappersbanan i sidorna fladdrar för mycket för att mätvärdena ska vara användbara. Det tar ca 30 sekunder för mätramen att gå en gång över pappersbanan och när den gjort det bildar den ett medelvärde av mätningarna och skickar det till operatörerna. Själva mätningen görs bara på papprets ovansida, inte på virasidan. Mätramens L*-, a*- och b*-värden blir kalibrerade när mätvärden från labbet kommer in. Dessa värden är dock fördröjda och om det är så att en omställning är pågående görs det först när den första nya rullen är tillverkad.

3.3 Störningar

Under kontinuerlig drift görs ofta förändringar av vilka massor som används vilket påverkar färgerna. Mängden krita, fukthalten med mera påverkar också. För att snabbt förhindra förändringar skulle dessa teoretiskt kunna framkopplas bort men stegsvaren för förändringarna är okända och det är osäkert om de är linjära samtidigt som det skulle ta lång tid och därigenom vara väldigt kostsamt att kartlägga störningarna. Till fördel för regulatören görs de flesta av förändringarna i tillförseln till blandningskaret vilket är väldigt stort och placerat tidigare i produktionsflödet än tillsättningen av färg, varför påverkan från förändringar i massorna ger relativt långsamma förändringar på färgen och regulatören har en chans att kompensera när förändringarna inte sker alltför snabbt. Förändringar i fukt sker senare i processen och utgör ett problem eftersom fuktförändringar i pappret gör att mätramens mätvärden blir mer osäkra då dessa inte är kompenserade för alla olika fukthalter utan bara för dess börvärde vilket ställer till det i omställningar av papprets ytvikt då fukten ofta blir fel samtidigt som färgen snabbt behöver bli rätt.

3.4 Ekonomiska aspekter

På Nymölla är kapaciteten att ta hand om papper från pappersmaskinerna betydligt större än pappersmaskinens förmåga att producera papper och de utgör alltså en flaskhals i produktionen. En ökning av produktion i pappersmaskinen ger således en ökad produktion för hela papperslinjen.

En förbättrad färgreglering skulle teoretiskt inte bara kunna minska andelen färgfel på producerat papper utan även minska den tid då papper inte tillverkas

Kapitel 3. Bakgrund

under omställning av papperskvalité. På Nymölla görs omställningar ofta och en minskning av omställningstiden ger därför en stor ekonomisk vinst.

Att det är av största vikt att tillverka så lite oanvändbart papper som möjligt gör även att undersökningar av processen inte kan göras hur som helst. Då till exempel stegsvar för olika färger undersöks är det viktigt att förändringarna är så små att pappret inte riskerar att hamna utanför kvalitetsgränserna så att pappret blir oanvändbart.

Störst möjlig ekonomisk vinst av förändrad färgreglering görs antagligen om antalet fulla papperstambourer som måste kasseras kan minskas. Att göra det är svårt eftersom onlinemätningarna inte är helt säkra samtidigt som det är svårt att göra en helt exakt modell då det är ett väldigt komplext system av olika faktorer som påverkar nyansen på pappret och hur onlinemätaren påverkas av olika förändringar. Därför ligger koncentrationen i arbetet på att göra omställningarna snabbare.

4

Regulatordesign

Eftersom nyansstyrning i en pappersmaskin är en process med en tidsfördröjning på några minuter är det naturligt att ansätta att en modell av systemet behövs för att modellera förändringar innan de går att mäta. För att göra detta bedömdes den vanligast använda dödtidsregulatorn, en Otto-Smith-prediktor vara en bra lösning [Hägglund, 2012]. På bruket användes redan en Otto-Smith-prediktor för att reglera till exempel fukt och krithalt i pappret vilket antagligen gör den enklare att acceptera och förstå för användarna.

Eftersom ett av huvudmålen med projektet var att kvalitetsomställningarna ska bli snabbare var det högt prioriterat att förändring i koncentration av optiskt vitt snabbt kan ändras i maskinkaret där den blandas. Eftersom nyansfärgernas tidskonstant är relativt liten försumrades denna helt och den nya referensen gavs direkt till nyansfärgernas flödesregulatorer.

Först behövdes alltså en modell för systemet utan tidsfördröjningen, en med tidsfördröjning och även observerare som observerar i vilket tillstånd systemet befinner sig i och därmed vilken bakgrundsfärg pappret har, alltså vilken färg pappret skulle ha om inte några färger användes, färgen på pappret minus färgernas beräknade inverkan.

4.1 Utrustningsuppställning

För att implementera styralgoritmer använder sig Nymölla pappersbruk av FbCAD vilket är en programmeringsmiljö lik IEC 61131-3-standardens Function Block Diagram för PLC-programmering, där funktioner representeras av block med in- och utportar vilket gör att även icke programmeringsvana användare ska kunna förstå det. För den programmeringsvane är det onödigt komplicerat och att implementera någon mer avancerad reglerstrategi som t.ex. MPC skulle vara väldigt tidskrävande och kräva en mycket stor arbetsinsats varför arbetet koncentrerades till att göra en regulator som relativt enkelt kan beräkna en utsignal utifrån uppskattad koncentration av färgämnen i våtändan av maskinen tillsammans med en beräkning av hur koncentrationerna borde förändras för att nå börvärdena.

Sampling

Vid bedömningen av hur snabbt systemet skulle samplas fanns en nedre systembegränsning vid 0.4 sekunder, kortare tid än så gick inte att implementera i Nymöllas datorer, medan någon övre gräns inte fanns. Snabbare sampling förbättrar systemets stabilitetsegenskaper då förändringar i flöden lättare blir de önskade och systemet kan reagera snabbare. Flödesmätarna till färgtillförseln samplade en gång per sekund och nya värden från mätramen kommer var 30:e sekund. För att göra regleringen bedömdes var 30:e sekund vara onödigt långsamt, det skulle eventuellt ge onödiga svängningar, men att sampla snabbare än flödesmätarna bedömdes inte kunna ge förbättrad prestanda, någon annan datorkraftsbegränsning fanns inte och samplingen valdes därför till en gång per sekund. Detta visade sig fungera väl och någon anledning att omvärdera samplingstiden fanns därför inte.

4.2 Modell

För att återkoppla förväntade förändringar med en Otto-Smith-prediktor behövs en modell av systemet. I den verkliga processen passerar pappersmassan flera steg efter att färgerna har tillsatts men eftersom tidskonstanterna för alla steg efter maskinkaret bedömdes vara relativt små försummas dessa helt i modellen. Dessutom antogs det att de linjära stegsvar som fanns dokumenterade på bruket stämde även om det är känt att stegsvaret för åtminstone optiskt vitt är olinjärt då det har en avtagande effekt vid höga koncentrationer. Modellen som gjordes har de olika färgkoncentrationerna i pappersmassan som tillstånd och utsignalen är de $L^*a^*b^*$ -värden som mäts av mätramen. Modellen gjorde på state-space-form enligt ekvation (4.1). Den kontinuerliga versionen av systemet med döttid kan ses i ekvation (4.2) där $N1$ är nyansfärg 1, $N2$ är nyansfärg 2, och OBA är optiskt vitmedel. Tidskonstanten för optiskt vitt τ_{Oba} beräknas enligt (4.3) medan tidskonstanten för nyansfärgerna τ_N valdes till 30 s, vilket huvudsakligen påverkar integrationstiden i regulatorn och inte har så mycket att göra med den faktiska tidskonstanten för nyansfärgerna som verkade vara mindre. Observera att C-matrisen innehåller färgernas stegsvar i $L^*a^*b^*$ -planet.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{4.1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{OBA}_{konc.}(t) \\ \dot{N1}_{konc.}(t) \\ \dot{N2}_{konc.}(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{oba}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_N} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OBA(t)_{konc.} \\ N1(t)_{konc.} \\ N2(t)_{konc.} \end{bmatrix} + \\
\begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{oba}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_N} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t - d\ddot{o}dtid)_{oba} \\ u(t - d\ddot{o}dtid)_{N1} \\ u(t - d\ddot{o}dtid)_{N2} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^*_{oba} & L^*_{N1} & L^*_{N2} \\ a^*_{oba} & a^*_{N1} & a^*_{N2} \\ b^*_{oba} & b^*_{N1} & b^*_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OBA_{konc.} \\ N1_{konc.} \\ N2_{konc.} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\tau_{oba} = \frac{V_{maskinkar}}{q} = \frac{\text{Volym maskinkar} \cdot \text{karets fyllnadsgrad}}{\text{Fl\ddot{o}de ut fr\ddot{a}n maskinkar}} \quad (4.3)$$

För att implementera modellen i FbCAD behöver den först diskretiseras. Eftersom koncentrationen av de olika färgerna är oberoende av de andra färgernas koncentrationer och tillsättning blir diskretiseringen enkel och kan göras med ekvationerna i (4.4).

$$\begin{aligned} A_d &= e^{A_c T} \\ B_d &= A_c^{-1} (A_d - I) B \\ C_d &= C_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

Varefter ett system som kunde implementeras var framtaget, vilket kan ses i ekvationerna i (4.5) med samplingsfördröjning enligt (4.6).

$$\begin{bmatrix} OBA_{konc.}(n+1) \\ N1_{konc.}(n+1) \\ N2_{konc.}(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{1}{\tau_{oba}}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{1}{\tau_N}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{1}{\tau_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OBA_{konc.}(n) \\ N1_{konc.}(n) \\ N2_{konc.}(n) \end{bmatrix} + \\
\left(I - \begin{bmatrix} e^{-\frac{1}{\tau_{oba}}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{1}{\tau_N}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{1}{\tau_N}} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u(n - n_d)_{oba} \\ u(n - n_d)_{N1} \\ u(n - n_d)_{N2} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} L^*_{f\ddot{a}rger}(n) \\ a^*_{f\ddot{a}rger}(n) \\ b^*_{f\ddot{a}rger}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^*_{oba} & L^*_{N1} & L^*_{N2} \\ a^*_{oba} & a^*_{N1} & a^*_{N2} \\ b^*_{oba} & b^*_{N1} & b^*_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OBA_{konc.}(n) \\ N1_{konc.}(n) \\ N2_{konc.}(n) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$n_d = \frac{\text{d\ddot{o}dtiden}}{\text{samplingstiden}} \quad (4.6)$$

Implementeringen av d\ddot{o}dtiden gjordes med speciella block gjorda för ändamålet i FbCAD.

4.3 Observerare

För att skatta systemets tillstånd gjordes antagandet att flödesmätarna som mätte tillförseln av färg var helt korrekta och att stegsvaren från dessa var helt korrekta. Alltså beräknades den förskjutning i L^* , a^* och b^* som färgerna borde ge upphov till och en observerare gjordes för att skatta bakgrundsfärgen på pappret. Eftersom mätvärdenas korrekthet är starkt beroende av hur länge sedan mätaren kalibrerades med värden från labbet samt om fukten i pappret avviker från önskad fukt gjordes skattningen så att operatören kan ange en procentsats för hur mycket mätvärdena ska användas.

Nya mätvärden kommer alltså in var 30:e sekund och beroende av värdet "mättramens trovärdighet" som operatören kan ställa in förändras den beräknade bakgrundsfärgen enligt ekvation (4.7).

$$\begin{aligned}
 j &\equiv \text{"mättramens trovärdighet"} \\
 \begin{bmatrix} L_{bakgrund}^*(n+1) \\ a_{bakgrund}^*(n+1) \\ b_{bakgrund}^*(n+1) \end{bmatrix} &= (1-j) \begin{bmatrix} L_{bakgrund}^*(n) \\ a_{bakgrund}^*(n) \\ b_{bakgrund}^*(n) \end{bmatrix} + \\
 &\quad j \left(\begin{bmatrix} L_{mättram}^*(n) \\ a_{mättram}^*(n) \\ b_{mättram}^*(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{färger}^*(n) \\ a_{färger}^*(n) \\ b_{färger}^*(n) \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Slutlig återkopplingen

Med bakgrundsfärgen av pappret känd tillsammans med färgernas inverkan både med och utan dödtid fås $L^*a^*b^*$ -värden som regulatorn återkopplar med. Värdena som återkopplas är bakgrundsfärgen från observeraren plus färgernas beräknade inverkan utan dödtid (alltså i våtändan av pappersmaskinen). Börvärdena för $L^*a^*b^*$ minus dessa blir alltså det fel som regulatorn får.

När felet är känt i de tre dimensionerna kan en matrismultiplikation med C-matrisens invers och felet göras för att få den förändring av färgkoncentrationerna som behöver göras. När bara L^* - och b^* -börvärden används och den andra nyansfärgen är avstängd är det istället $C_{2 \times 2}$ enligt (4.8) som inverteras och multipliceras med felet för att få felet i koncentration i OBA och nyansfärg 1.

$$C_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} L_{oba}^* & L_{N1}^* \\ b_{oba}^* & b_{N1}^* \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Den nya önskade koncentrationen är alltså den nuvarande koncentrationen plus in-
 versen av C multiplicerat med felet enligt den övre ekvationen i (4.9) om OBA
 och två nyanseringsfärger används. Används bara en nyanseringsfärg är det istället

enligt den nedre ekvationen som den nya referenskoncentrationen beräknas.

$$\begin{bmatrix} OBA_{ref.konc.} \\ N1_{ref.konc.} \\ N2_{ref.konc.} \end{bmatrix} = C_{3 \times 3}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L_{börvärde} - L_{återkopplat} \\ a_{börvärde} - a_{återkopplat} \\ b_{börvärde} - b_{återkopplat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} OBA_{konc.} \\ N1_{konc.} \\ N2_{konc.} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} OBA_{ref.konc.} \\ N1_{ref.konc.} \end{bmatrix} = C_{2 \times 2}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L_{börvärde} - L_{återkopplat} \\ b_{börvärde} - b_{återkopplat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} OBA_{konc.} \\ N1_{konc.} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.4 Förstärkning

För att ändra koncentrationen av optiskt vitmedel i pappret krävs det att koncentrationen i maskinkaret ändras till den nya önskade koncentrationen (från inversen av C-matrisen multiplicerat med felet). Görs denna förändring genom att bara sätta den nya önskade koncentrationen tar det lång tid innan koncentrationen höjs i karet eftersom karet är stort. Därför sätts istället koncentrationen av optiskt vitt till maskinkaret till den nya önskade koncentrationen plus felet multiplicerat med en relativt stor förstärkning. När felet går mot noll går alltså även det önskade flödet mot den önskade koncentrationen.

När förstärkningen skulle bestämmas gjordes först simulationer i MATLABs Simulink där förstärkning valdes för att regleringen skulle vara den optimala. Förstärkningen valdes därför så att hela felet togs bort på en iteration. Resultatet gav en regulator med nära on/off-reglering vid förändringar men en styrsignal enligt ekvation (4.10) och begränsning enligt (4.11).

$$u_{oba} = (OBA_{ref.konc.} - OBA_{konc.}) \frac{\text{volym maskinkar}}{\text{volym inflöde under en sampling}} + OBA_{ref.konc.} \quad (4.10)$$

$$0 \leq u_{oba} \leq u_{oba_{max}} \quad (4.11)$$

I simuleringar fungerade styrsignalen enligt ovan väldigt bra. Den är visserligen känslig för störningar men att flödet av OBA snabbt ändras är egentligen inte ett problem då det just är innan en stor tank det sprutas in och tanken fungerar som ett lågpasfilter. Den extrema förstärkningen gör regulatorn väldigt snabb vilket visade sig vara ett problem eftersom de inre flödesregulatorerna inte hängde med.

Förstärkningen var initialt onödigt hög eftersom gränserna ändå begränsar utsignalen, för att få en mindre aggressiv reglering sattes en faktor k in i beräkningen av felet vilken sedan ställdes in efter manuell övervakning av regleringens beteende.

Att den inre regulatorn är långsammare än den yttre skapade en viss oönskad självsvängning. För att få bort självsvängningen sattes därför en hysteres på felet in så att när felet är mindre än den valda hysteresen sätts förstärkningen av felet till noll och styrsignalen blir bara den önskade koncentrationen, vilket visade sig fungera väl. Styrsignalen för optiskt vitt ändrades alltså till att beräknas enligt (4.12).

$$\begin{aligned}
 u_{oba} &= K \cdot (OBA_{ref.konc.} - OBA_{konc.}) \frac{\text{volym maskinkar}}{\text{volym inflöde under en sampling}} \\
 &\quad + OBA_{ref.konc.} \\
 K &= \begin{cases} 0 & \text{då } |e| < HYST_{oba} \\ k_p & \text{annars} \end{cases} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

För att beräkna styrsignalen för nyansfärgerna användes en annan metod. Eftersom tidkonstanten för nyansfärgernas är kortare än den för optiskt vitt då de blandas in efter maskinkaret kunde den nya önskade koncentrationen direkt sättas som önskat flöde till massan. Detta får effekten att nyansfärgerna slår in betydligt snabbare än effekten av optiskt vitt. Simulation med detta och även tester på pappersmaskinen fungerade väl men en översvängning i a* kunde ses och resultatet blir enligt figur 4.1 där styrsignalen är enligt figur 4.2.

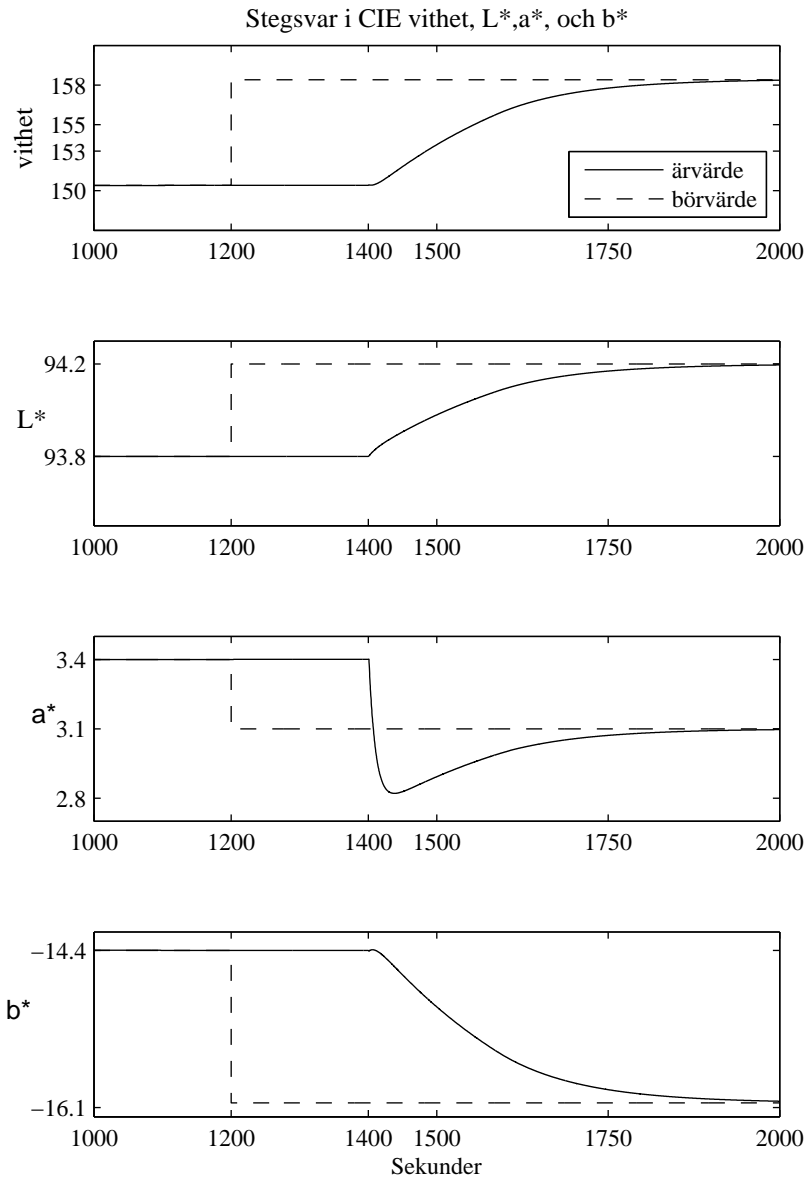
Observera hur styrsignalen av optiskt vitt mättar under drygt tre minuter i figuren vilket ger en väldigt snabb reglering. Att nyansfärgerna slår så snabbt ger den oönskade svängningen förbi a*-börvärdet, under normal omställning av papperskvalitén kasseras allt papper mellan kvalitéerna och den oönskade svängningen har då inte någon inverkan men om det sker då regulatorn kopplas in eller under en mindre omställning när kvalitéerna går in i varandra blir svängningen ett större problem. För att återgärda översvängningen minskades därför förstärkningen och en ny lämplig förstärkning togs från simuleringen genom att modulera färgkoncentrationen som ett första ordningens system med tidskonstanten 30 sekunder och sedan använda nuvarande koncentration plus en tredjedel av felet som utsignal. En vanlig PI-regulator skulle naturligtvis kunna användas istället för denna tillstånd-såterkoppling men programmet var utformat på ett sätt som gjorde denna variant lätt att implementera varför den användes. Det nya systemets stegsvar blev då enligt figur 4.3 med styrsignal enligt figur 4.4.

4.5 Beräkning av processparametrar

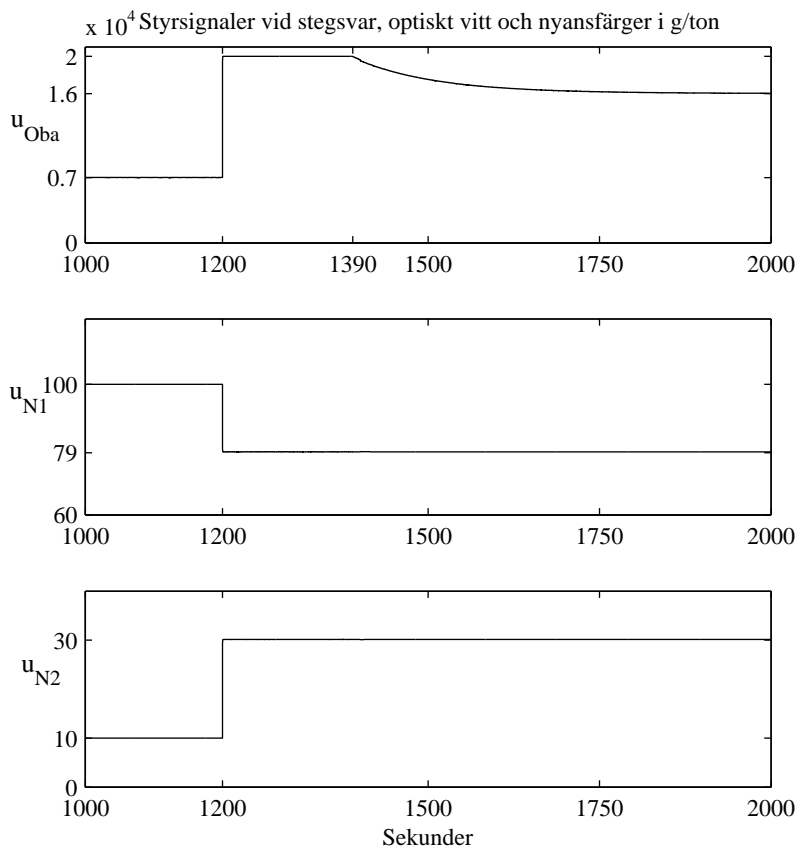
För att få fram de okända parametrarna i modellen gjordes en del antaganden. Tidskonstanten för nyansfärgerna sattes experimentellt för att få en bra integrationstid samtidigt som den verkar som ett filter för brus i flödet och flödesregulatorerna för nyansfärgerna har ett visst moment vilket gör tidskonstanten för det inre systemet svår att modellera.

Tidskonstanten för optiskt vitt approximerades till volymen av massan i maskinkaret dividerad med flödet ut från maskinkaret enligt (4.6).

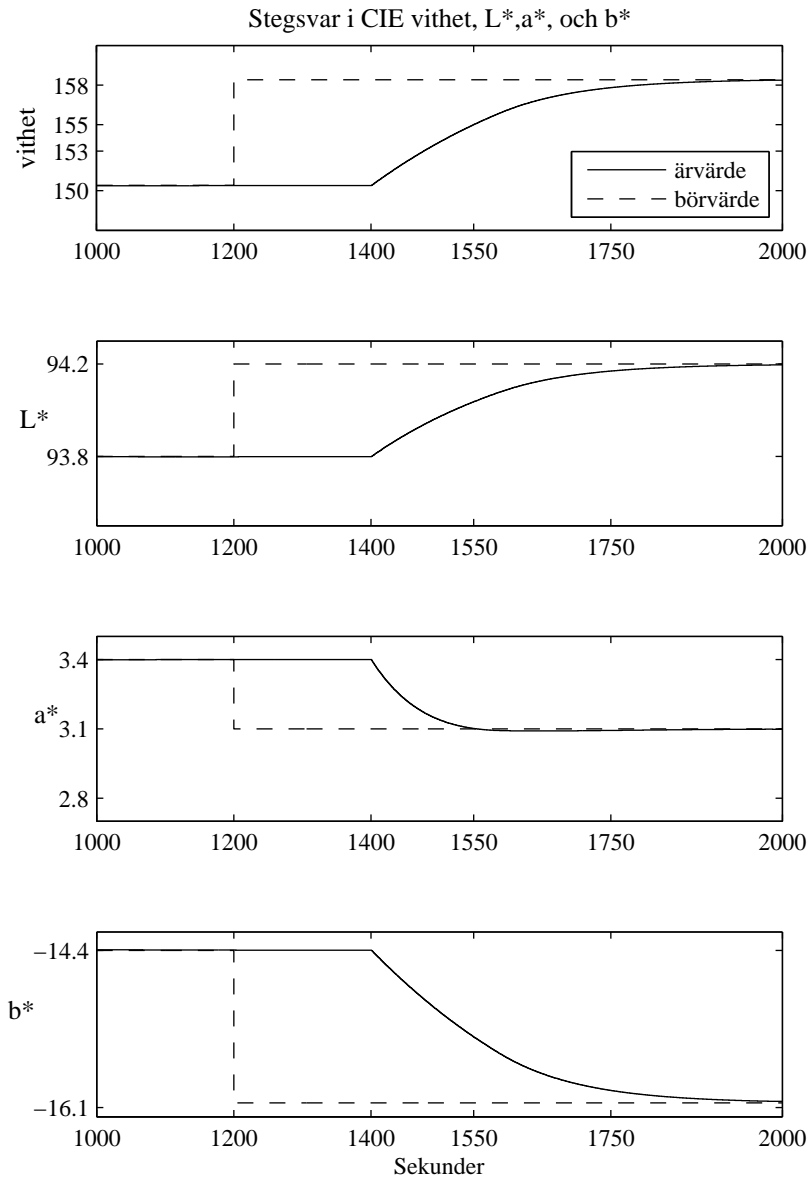
Dödtiden för nyansfärgerna går att mäta ganska väl vid färgomställningar men den uppmätta dödtiden gäller då bara för de förhållanden som råder just då. När hastigheten på pappersmaskinen ändras eller ytvikten på pappret ändras så att flödesvolymerna varierar är inte längre det uppmätta värdet intressant, en modell för



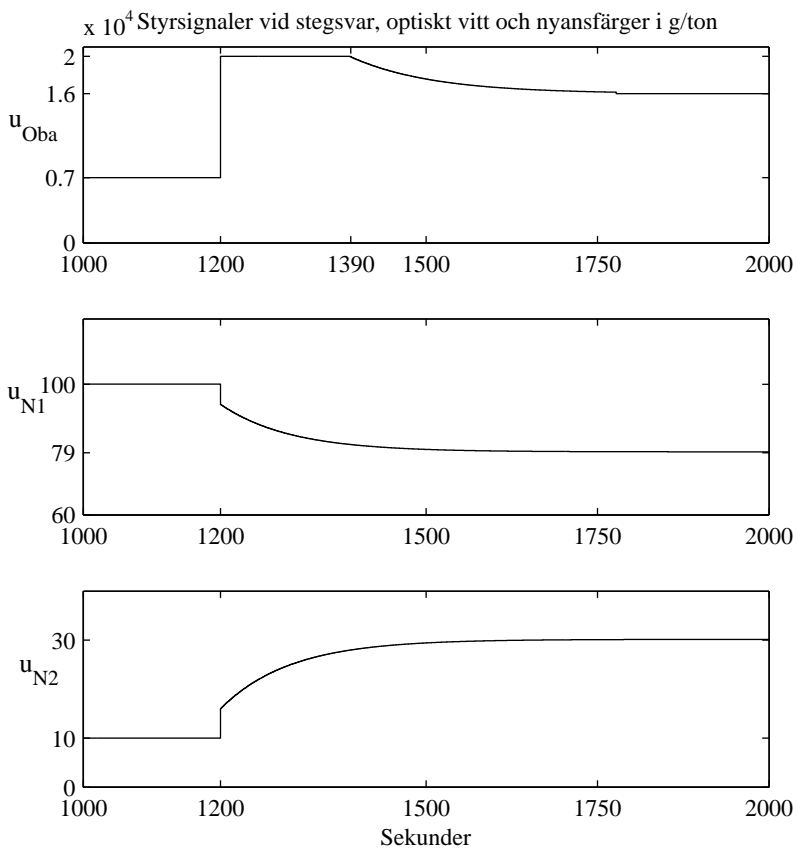
Figur 4.1 Simulering med den nya önskade koncentrationen av nyansfärg som utflöde.



Figur 4.2 Styr signal vid simulering med den nya önskade koncentrationen av nyansfärg som utflöde.



Figur 4.3 Simulering med tillståndsåterkoppling för flöde av nyansfärg.



Figur 4.4 Styrsignal vid simulering med tillståndsåterkoppling för flöde av nyansfärg.

dödtiden gjordes därför. Dödtiden delas upp i två delar, en del för när pappret är på maskinen och en del för fördröjningen i rören mellan maskinkaret och viran i våtåndan.

Hastigheten på pappret i maskinen skiljer sig mellan olika delar av maskinen, mellan olika cylindrar som pappret går runt finns olika kvoter för hur hastigheten ska förändras och hastigheten vid popen längst fram är på Nymölla normalt sett några procent högre än hastigheten på viran i våtåndan. För att approximera dödtiden i pappersmaskinen beräknades därför genomsnittet av hastigheten på viran och hastigheten vid popen för att få dödtiden i pappersmaskinen enligt ekvation (4.13).

$$Dödtid_i \text{ maskin} = \frac{\text{Pappersbanans längd} \cdot 2}{v_{\text{pope}} + v_{\text{våtända}}} \quad (4.13)$$

Dödtiden i maskinen står i normal drift för ungefär 40 sekunder av dödtiden medan den totala dödtiden är ungefär 180 sekunder så den största delen av dödtiden är alltså från när massan går genom olika steg mellan maskinkaret och viran. Hur långa rören är i våtåndan var inte praktiskt möjligt att mäta men flödeshastigheten är känd och eftersom tiden för ett flöde genom ett rör förhåller sig omvänt proportionerligt mot flödeshastigheten gjordes antagandet att också dödtiden mellan maskinkaret och viran förhåller sig omvänt proportionellt till flödeshastigheten ut från maskinkaret. Genom att göra en mätning när maskinen kör under normala förutsättningar kunde en konstant tas fram enligt ekvation (4.14) som sedan kan delas med flödeshastigheten för att få dödtiden i våtåndan och därmed den totala dödtiden enligt ekvation (4.15).

$$c = \left(Dödtid_{\text{uppmätt}} - Dödtid_i \text{ maskin} \right) \cdot q_{\text{maskinkar}} \quad (4.14)$$

$$Dödtid_{\text{total}} = Dödtid_i \text{ maskin} + \frac{c}{q_{\text{maskinkar}}} \quad (4.15)$$

4.6 Stabilitet

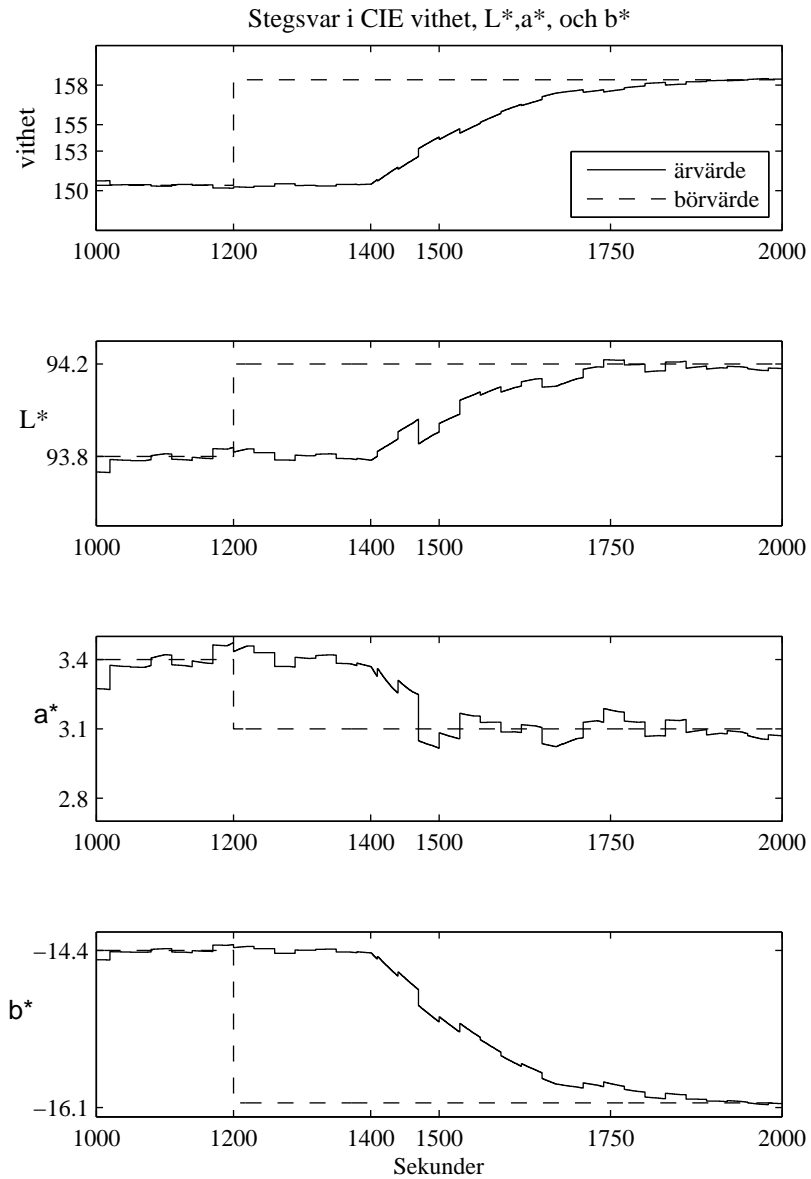
När en Otto-Smith-prediktor används får systemet en känslighet för fel i modellen, stämmer inte modellen kan oönskade svängningar uppstå och det tar längre tid att komma till börvärdena. Innan testningen på maskinen började undersöktes därför hur olika modellfel yttrar sig. Det visade sig att med observaren var det inte något som gav oönskade svängningar och regulatorn var stabil. Variansen för $L^*a^*b^*$ -värdena mättes upp och Simulink-modellen kördes med denna för att se att den var stabil. Beroende på det angivna värdet på "mätarmens trovärdighet" kommer bruset även återspegla sig i styrsignalerna. Ett lägre värde ger mindre brus i styrsignalerna men gör också att det tar längre tid att reagera på laststörningar. En simulation med mätarmens trovärdighet på 20 % kan ses i figur 4.5. Simulationer med över- och underskattade tidskonstanter i modellen gjordes också. I figur 4.6 med styrsignalerna i

4.7 ses fallet då modellens tidskonstanter är häften så stora som processens tidskonstant och i figur 4.8 med styrsignalerna i 4.9 ses fallet då modellens tidskonstanter är dubbelt så stora som processens.

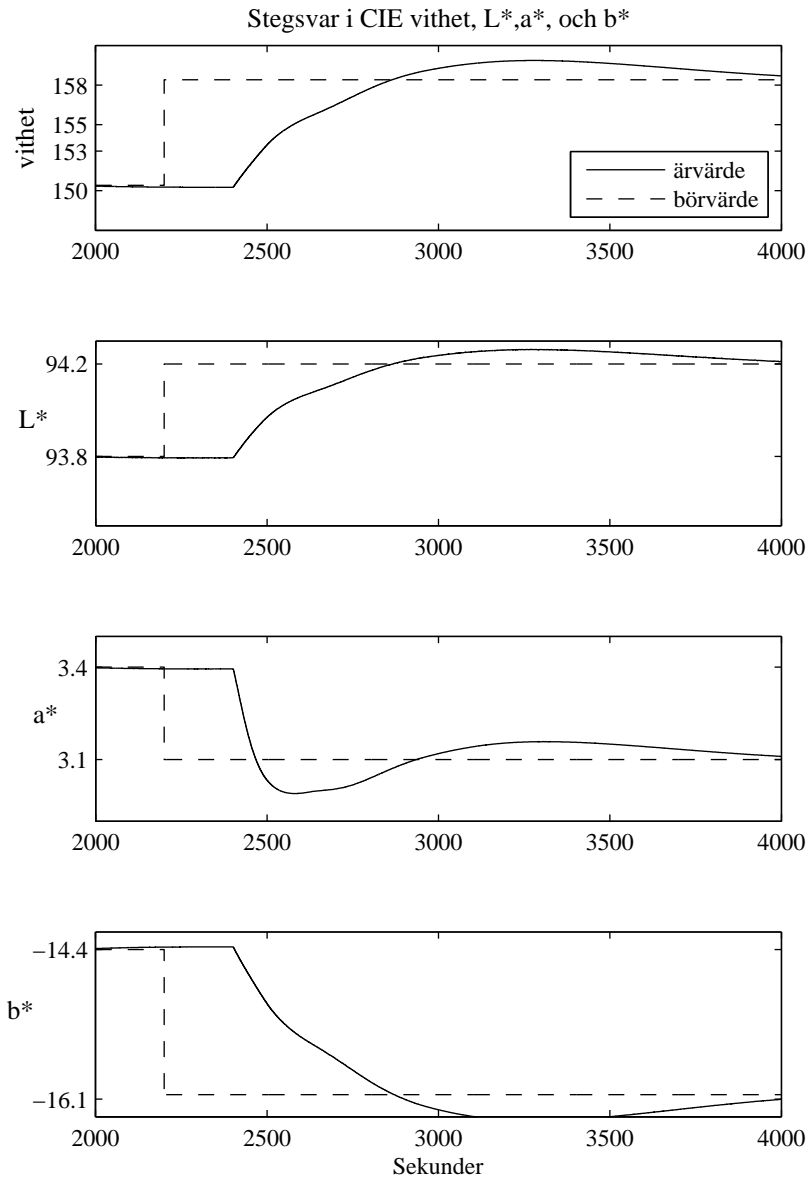
Även om tidskonstanterna skulle vara gravt feluppskattade är systemet alltså fortfarande stabilt, motsvarande plottar gjordes även för feluppskattad dödtid vilket visade att bara mycket små förändringar i stegsvaret sker och regulatorn är väldigt tålig för feluppskattningar även i dödtiden. Fel i modellens stegsvar gör att det tar längre tid för regulatorn att hitta rätt på samma sätt som det tar längre tid om tidskonstanten i modellen är felaktig.

4.7 Börvärdeshanterare

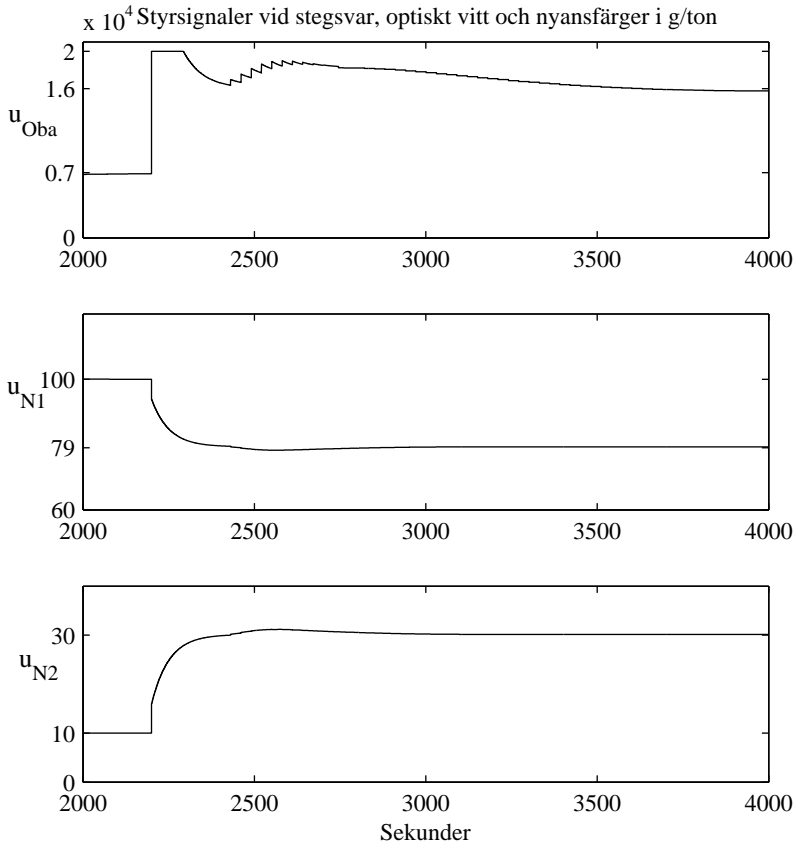
För att omställningarna ska gå så snabbt som möjligt är det av hög prioritet att börvärderna till regulatorn ändras vid rätt tillfälle vid omställningar. Det bästa är om själva färgskiftningen börjar vid popen direkt efter att den sista tambouren av den tidigare kvalitén skiftats ut. För att förändringen ska börja då behöver börvärderna till regulatorn skiftas till de nya börvärderna lika lång tid före tambourskiftet som längden av dödtiden. Det gjordes därför en modul för att automatiskt skifta in nya börvärden vid omställningar. Eftersom dödtiden bara är en uppskattning och kan vara lägre än uppskattat lades en marginal till för att inte riskera att förändringen börjar ske redan under produktion av den tidigare kvalitén.



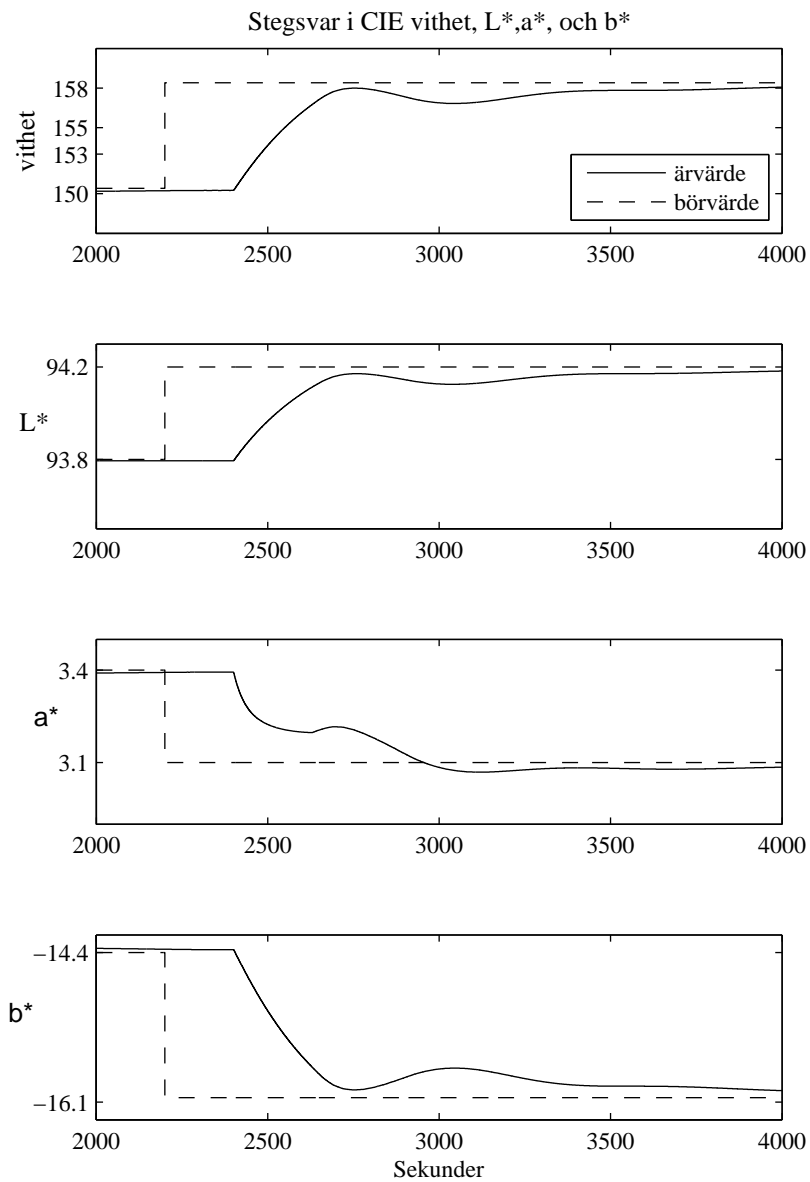
Figur 4.5 Simulink-simulation med mätarens trovärdighet som 20 %.



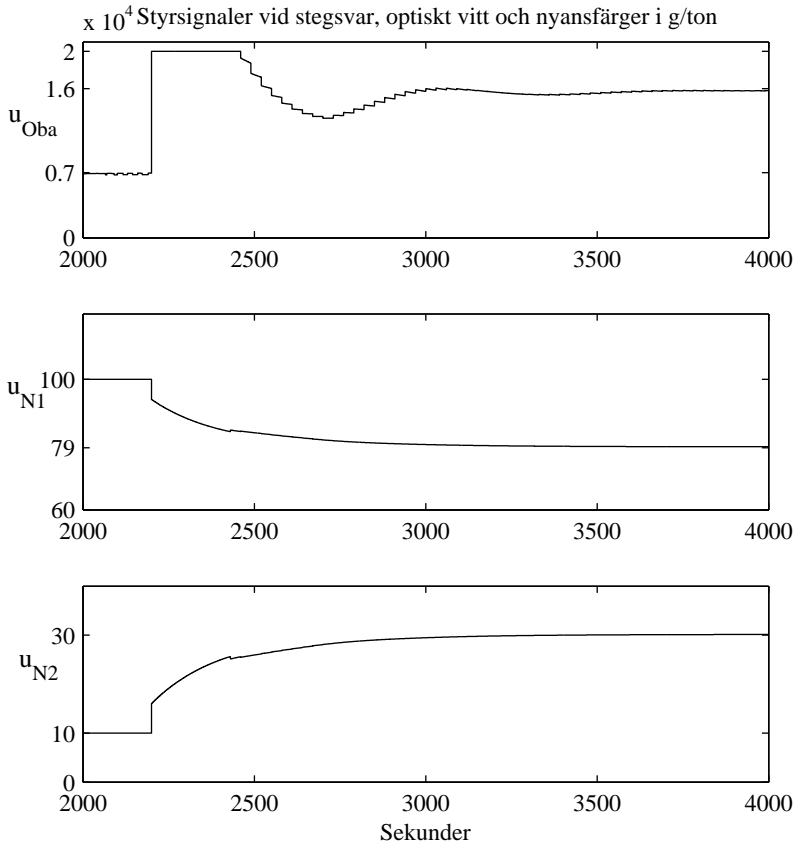
Figur 4.6 Simulink-simulation med inre modell med dubbelt så stora tidskonstanter som processen.



Figur 4.7 Styrsignal för simulink-simulation med inre modell med dubbelt så stora tidskonstanter som processen.



Figur 4.8 Simulink-simulation med inre modell med hälften så stora tidskonstanter som processen.

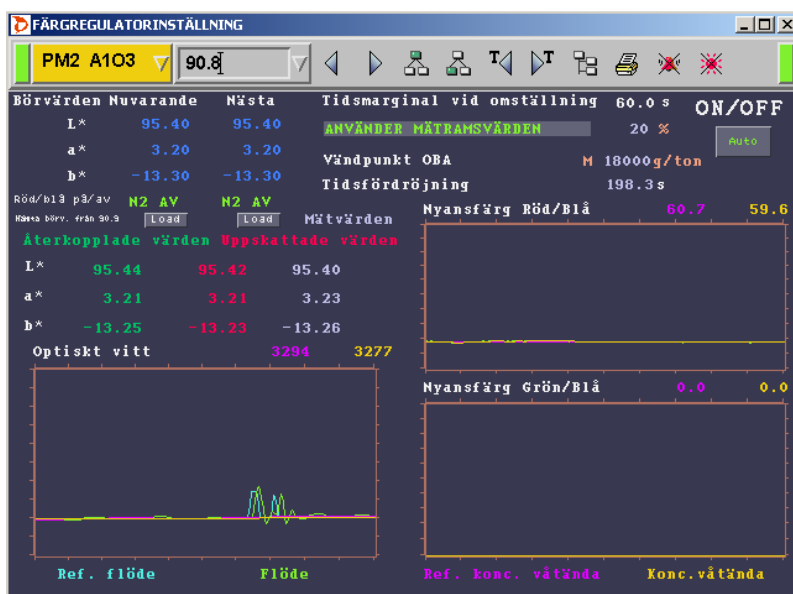


Figur 4.9 Styrsignal för simulink simulation med inre modell med hälften så stora tidskonstanter som processen

5

Användargränssnitt

Tanken bakom användargränssnittet var från början att operatörerna skulle kunna styra mycket och att allt möjligt skulle kunna ses. Det visade sig dock snabbt att operatörerna inte riktigt hade tid att lära sig ett nytt system när de väl skulle använda regulatören vilket pressade utvecklingen av regulatören så att den krävde mindre av användaren. För att slå på regulatören implementerades en knapp som tar över styrningen av börvärdena till flödesregulatorerna samtidigt som en avkoppling av samma knapp gör att regleringen återgår till det vanligaste läget regleringen görs i när det görs manuellt (A L, auto-lokal mode). Själva användargränssnittet kan ses i figur 5.1.



Figur 5.1 Operatörssidan för PM2, kallad 90.8 i det interna systemet.



Figur 5.2 Operatörssidan 90.8.1 för PM2, undersida till 90.8.

Förutom att slå på och av styrningen är det viktigt att operatörerna är bekväma med att via GUI:t säga till observeraren när mätramens värden antagligen är felaktiga, vid fuktfel eller då något annat hänt som påverkar mätramens förmåga att mäta färgen rätt. Vid inkörningen av regulatorm visade det sig dessutom att många operatörer reagerade på de stora börvärdesförändringar till flödesregulatorn av optiskt vitt som sker med den nya regulatorm. För att operatörerna skulle känna sig bekväma med de stora förändringarna och att de bara pågår under kort tid prioriterades även en trend-plott med börvärdet av koncentrationen av optiskt vitt i maskinkaret, nuvarande skattning av koncentrationen, börvärdet av flödet av optiskt vitt till maskinkaret samt nuvarande flöde av optiskt vitt. Eftersom motsvarande förändringar för nyansfärgerna är mycket mindre är operatörerna inte så oroliga för dessa och plotterna blir därför också mindre intressanta.

Utöver den vanliga driftsidan för regulatorm har det även gjorts en undersida för inmatning av stegsvar för optiskt vitt och de olika nyansfärgerna. Inmatning av död tid för beräkning av konstant som kan användas för kontinuerlig beräkning av död tiden enligt ekvation (4.14). Dessutom finns ett interface för att mata in $L^*a^*b^*$ -mätvärden så att om mätramens skulle börja ge felaktiga värden kan operatörerna på så sätt sätta "mätramens trovärdighet" till 0 % och sedan mata in mätvärden från labbet här. Avsikten är alltså att undersidan, se figur 5.2 (90.11.1 på PM1 och 90.8.1 på PM2), inte ska användas när allt är inställt och fungerar som det ska.



Figur 5.3 Operatörssidan 90.11.2 för PM1, undersida till 90.11.

Dessutom gjordes en undersida för att fritt välja vilka trender som ska följas, där operatören kan välja längden på x-axeln och skalan på y-axeln vilken kan ses i figur 5.3 (90.11.2 på PM1 och 90.8.2 på PM2).

6

Resultat och utvärdering

Sedan det första live-testet av regulatorn har den fungerat så tillvida att den har svängt in så att mätramens värden relativt snabbt kommer direkt på börvärdena. Vid de första testerna var dödtiden ordentligt feluppskattad men eftersom regleringen sker mot observerares värden märktes det inte speciellt att dödtiden var fel. Några extra svängningar på grund av feluppskattningen observerades inte. Däremot upptäcktes det en självoscillering på grund av att den yttre regulatorn är snabbare än den inre, vilket gjorde att förstärkningen förändrades enligt avsnitt 4.4.

När regulatorn kopplas in under vanlig drift ser man normalt sett snabbt en tydlig skillnad eftersom färgen då svänger in så att den lägger sig direkt på börvärdena. Även vid omställningar har regulatorn fungerat tillfredställande. Vid manuell styrning har tidigare ett antal olika metoder för att ställa in färgen använts, dels att köra ner pappret till upplösaren under hela omställningen och ta ett provpapper vid popen för att mäta på utan att göra en kalibrering och dels har omställningar gjorts genom att först köra ner papper och sedan blåsa upp pappret på ett tomjärn så att de sista två-tretusen metrarna av omställningen blir en egen tambour som mätaramen kan kalibreras mot. Den senare av dessa metoder har testats med färgreglering och regleringen har då fungerat väldigt bra.

Tyvär har inte handledning av maskinförarna kunnat genomföras i önskad utsträckning eftersom de vill ha någon på plats som hjälper till om något oväntat skulle hända. Några maskinförare kom snabbt att tycka att det var smidigt att använda sig av den automatiska regleringen medan andra har varit mer skeptiska.

Avsikten har hela tiden varit att regulatorn ska fungera så bra att operatörerna själva väljer att använda sig av den automatiska regleringen, men att nå dit kräver en stor tilltro till regulatorn som i skrivande stund delvis saknas men som har potential att utvecklas med tiden. Risken att användningen av regulatorn helt upphör med dagens förutsättningar bedöms inte som stor eftersom stöd finns inte bara från vissa operatörer utan även ifrån aktuella chefer.

Hur mycket kortare omställningstiderna blir med den nya regulatorn är svårt att få fram. Bara en kvalitetsomställning på vardera pappersmaskin har gjorts då tiden jämförts med tidigare omställningar. På PM1 gjordes en omställning som tog 23 minuter och genom att studera data över tidigare tillverkade tambourer kunde

		PM1	PM2
Färgomställningar i november	n	47	28
Snitt per dag	$s = \frac{n}{30}$	1,57	0,93
Skattad färgomställningstid med manuell styrning	t_{man}	44,5 min	23 min
Skattad färgomställningstid med färgregulator	t_{auto}	23 min	13 min
Skattad sparad tid per färgomställning	$t = t_{man} - t_{auto}$	21,5 min	10 min
Sparad tid per dag	$T = t \cdot s$	33,68 min	9,3 min
Total effekthöjning	$h = \frac{T}{24 \cdot 60}$	0,0234	0,0065
Skattad omsättning per år	$oms.$	1,38 mdrkr	1,38 mdrkr
Skattad inkomstökning per år	$= h \cdot oms.$	32,3 mnkr	8,9 mnkr

Tabell 6.1 Grov uppskattning av den potentiella vinsten med färgregulatorn

två omställningar med samma start- och slutkvalité hittas när all sparad data från de senaste nio månaderna gått igenom. Den ena av dessa tog 22 minuter och den andra 67 minuter. Efter det aktuella testet höjdes förstärkningen för nyansfärgerna eftersom de varit den begränsande faktorn i omställningen och motsvarande omställning skulle därför garanterat gå snabbare om den kördes i auto igen.

På PM2 gjordes en omställning där färgen ställde in sig så snabbt att det istället blev fukthalten som begränsade hastigheten för omställning, totalt tog det 13 minuter innan pappret omställningen var klar och data för 8 stycken motsvarande omställningar kunde hittas. Av de tidigare manuella omställningarna var den snabbaste också på 13 minuter, snittet på 23 minuter och standardavvikelsen 7,7 minuter. För att göra en skattning av den potentiella vinsten med regulatorn gjordes en beräkning enligt tabell 6.1 med uppskattningen att lika mycket av företagets omsättning kommer från de två pappersmaskinerna, år 2013 omsatte Stora Enso Nymölla 2,76 mdrkr [Merinfo.se, 2014]. Värdet av det återanvända pappret från omställningar är inte med i uppskattningen.

Regulatorn har körts i flera dygn i vanlig drift utan omställningar och färgen har då hela tiden följt börvärdena med betydligt mindre varians än när färgregleringen sköts manuellt. När två tambourer tillverkats efter varandra och kalibrering av mätramen inte gjorts efter den första har det dock förekommit att mätramen visade så felaktiga $L^*a^*b^*$ -värden innan kalibreringen att den sista tabouren hamnade utanför gränserna för vad som är godkänd färg varför mätramens precision måste förbättras innan färgregulatorn kan användas under kontinuerlig drift, det vill säga utanför omställningarna.

7

Diskussion och framtida utvecklingsmöjligheter

Tidigt i arbetet kom idén att om regleringen inte fungerade tillräckligt bra skulle det alltid gå att framkoppla de olika störningarna men då det visade sig att detta inte var ett problem borde framtida utveckling istället inriktas på andra områden. För att göra så att regleringen snabbare observerar fel skulle det gå att förfina modellen, antagligen skulle en förfining sluta i ett minst sjätte ordningens system och observeraren skulle kunna göras snabbare med en modell som stämmer bättre med verkligheten.

Enklare att genomföra och även eftertraktat av driftoperatörerna är att börvärdena från de olika kvalitéerna borde läsas in automatiskt av regulatorn från Nymöllas system för variabler kopplade till de olika kvalitéerna. Genom att göra det skulle färgregleringen bli i det närmaste helt automatisk och driftförarna skulle i normal drift och normala omställningar över huvud taget inte behöva tänka på färgen.

Eftersom färgen i de flesta omställningarna inte längre är den långsammaste delen är det ur ett ekonomiskt perspektiv inte längre så intressant att lägga ytterligare resurser på att göra den snabbare, utan bara på att den fungerar på önskvärt sätt. Utveckling och forskning bör istället läggas på de andra processer som är långsammare.

Eftersom bakgrundsfärgen ändras under omställningen samtidigt som fel i fukthalt gör att mätramen visar felaktiga värden skulle det eventuellt behövas framkoppling av vad bakgrundsfärgen på den kommande kvalitén har varit vid tidigare tillverkning för att kunna göra omställningar utan att använda mätramen.

Även om färgningen inte längre är det intressantaste området för vidareutveckling är den fortfarande den långsammaste processen vid färgomställningar och det är möjligt att den skulle gå att förbättra ytterligare, den nya regulatorn är inte testad tillräckligt för att avgöra om det finns potential för förbättring här eller ej.

Vid manuell styrning har operatörerna inte koncentrerat sig på att få färgen exakt på $L^*a^*b^*$ -börvärdena utan ofta nöjt sig när de haft god marginal till kassationsgränserna, med den nya regulatorn som alltid styr exakt till börvärdena har

variansen minskat betydligt vilket borde göra att det går att omvärdera om det går att flytta börvärdena inom gränserna så att det går att producera papper enligt samma krav som tidigare men med andra börvärden som gör att det går åt mindre färg och optiskt vitt. Åt vilket håll $L^*a^*b^*$ -börvärdena bör förändras skulle kunna beräknas med en optimeringsalgoritm som tar hänsyn till varians i processen och variansen av mätramens fel vid kalibreringar tillsammans med kostnaden för de olika färgerna för att kontinuerligt ge de optimala börvärdena ur ett kostnadsperspektiv.

Litteratur

Hägglund, T. (2012). *Reglerteknik AK Föreläsningar*. Institutionen för Reglerteknik vid LTH.

Instruction manual for Metso IQ Color MD Control (2012). Metso automation.

Merinfo.se (2014). *Stora enso nymölla aktiebolag*. [Online; hämtad 9-December-2014]. URL: <http://www.merinfo.se/foretag/Stora-Enso-Nym%C3%B6lla-Aktiebolag-5560704446/2jyp70e-anjh>.

Lund University Department of Automatic Control Box 118 SE-221 00 Lund Sweden	<i>Document name</i> MASTER 'S THESIS	
	<i>Date of issue</i> January 2015	
	<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5962--SE	
<i>Author(s)</i> Per Johansson	<i>Supervisor</i> Olle Svensson, Stora Enso Nymölla Tore Hägglund, Dept. of Automatic Control, Lund University, Sweden Charlotta Johansson, Dept. of Automatic Control, Lund University, Sweden (examiner)	
	<i>Sponsoring organization</i>	
<i>Title and subtitle</i> Automatisk reglering av färgnyans på pappret i en pappersmaskin		
<i>Abstract</i> <p>This paper deals with design and implementation of a regulator to control the tint of the paper on Stora Enso Nymölla AB's paper machines. The paper industry is a major industrial area in Sweden with continuous processes running around the clock with as short downtime as possible, which places special demands on the running and testing of controllers. The paper machine is in many cases the bottleneck of production so small improvements often have great effect. To improve the overall efficiency of the paper machine a regulator has been made to reduce the downtime at grade changes. The controller is designed for programmable logic controllers in Metso DNA system's fbCAD and a GUI has been designed for the machine operators. Tests on the paper machines show that an Otto-Smith predictor and associated controller can make grade changes significantly shorter with the result that less paper must be discarded than with the previous manual control strategy. A sufficient number of tests to ensure statistically how much the downtime decreases have not been made but the few that have been made show a decrease of downtime by 50 % at color grade changes compared to when they are done manually.</p>		
<i>Keywords</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> 1-41	<i>Recipient's notes</i>
<i>Security classification</i>		