

ISSN 0280-5316
ISRN: LUTFD2/TFRT--5530--SE

Tidsoptimering av en lödprocess

Mats Ahnelöv

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
Juni 1995

Department of Automatic Control Lund Institute of Technology P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> MASTER THESIS	
		<i>Date of issue</i> June 1995	
		<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5530--SE	
<i>Author(s)</i> Mats Ahnelöv		<i>Supervisor</i> Lennart Andersson, Mats Johnsson, Rolf Johansson	
		<i>Sponsoring organisation</i> Cetetherm AB	
<i>Title and subtitle</i> Time optimization of a solder process, Tidsoptimering av en lödprocess			
<i>Abstract</i> <p>This report investigates time optimization of a process where brazed heat exchangers are soldered in a vacuum furnace. This process consists of three phases, heating, soldering and cooling. Physical models have been obtained by using stationary conditions. These are not sufficient to describe the actual very complex behavior. Instead, nonphysical models have been identified. Simulations of the heating and soldering phases, based on the identified models, indicates that it is possible to reduce the heating and soldering times by 10 minutes each, when the maximum heat exchanger weight is less than 2000 kg. Implementation of a sequential fan controller for the cooling phase has reduced the cooling time from about 180 minutes to about 130 minutes. Also, by use of control, emergency cooling is avoided.</p>			
<i>Key words</i> Solder process, Sequential control			
<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> 39	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Fax +46 46 110019, Telex: 33248 lubbis lund.

Innehåll

1	Förord	2
2	Inledning	3
3	Målsättning och Metoder	4
3.1	Målgrupp	4
3.2	Utrustning	4
4	Uppvärmningsfas	5
4.1	Referenskurvan	6
4.2	Mätuppställning	8
4.3	Inledande försök	8
4.4	Modellering	9
4.5	Identifiering	11
4.6	Simulering	14
4.7	Analys av uppvärmningsfasen	14
5	Kylningsfas	15
5.1	Mätuppställning	16
5.2	Modellering av lasttemperatur	16
5.3	Identifiering av lasttemperaturen	17
5.4	Modellering av kylvattentemperatur	17
5.5	Identifiering av kylvattentemperaturen	18
5.6	Ugnens styrsystem	20
5.7	Reglering	21
5.8	Resultat av regleringen	25
6	Slutsatser	26
A	Appendix	28
A.1	Tillståndstabell	29
A.2	Utsignalen	31
A.3	Nästa tillståndsfunktionen	32
A.4	Hela grindnätet	35
A.5	Signaländringar	36
A.6	Användning av regleringen	36
A.7	Implementering i styrprogrammet	36

Kapitel 1

Förord

Jag vill rikta ett speciellt tack till mina handledare Lennart Andersson och Mats Johnsson. Små sparkar i rätt riktning har varit till stor nytta.

Den praktiska uppkopplingen och implementeringen har Håkan Göransson hjälpt mig med.

Kapitel 2

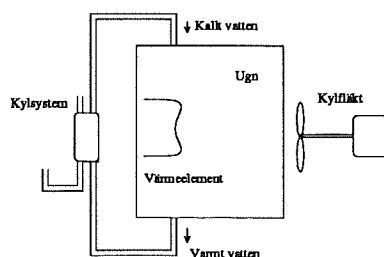
Inledning

Detta examensarbetet behandlar reglering och identifiering av en ugnprocess och är utförd på avdelning Lötta vid Cetetherm AB.Handledning har kommit från Institutionen för Reglerteknik i Lund.

Cetetherm AB är ett företag i Ronneby som ingår i TetraLaval-koncernen. De tillverkar plattvärmeväxlare, tubvärmeväxlare, beredare och färdiga värme- och kylanläggningar. Lötta är en avdelning som producerar plattvärmeväxlare. Dessa monteras och löds sedan i en vakuumugn.

Hjärtat i produktionen är ugnprocessen. Den är en av de viktigaste processerna och påverkar hållfasthet och kvalitet. Kan man optimera cykeltider är mycket vunnet eftersom ugnprocessen förbrukar mycket energi och produktionstiden är dyr.

Mitt arbete ska koncentreras kring ugnen och dess kylsystem, se figur 2.1. Vi är intresserade av temperaturerna i ugnslasten och kylsystemet.



Figur 2.1: Principskiss över ugnen och dess kylsystem. Elektriska värmelement värmer upp lasten. Kallt vatten strömmar in i ugnens kylsystem och varmt vatten kommer ut. Det varma vattnet kyls ner av vatten från ett kyltorn.

Ugnen värms upp av elektriska värmelement tills lasten uppnår lödtemperatur. Sedan startar en kylprocess där en fläkt påskyndar avsvlningsförloppet tills lasten har stelnat och kommit ner i temperatur. Kylanläggningen håller ugnskärlet svalt och transporterar bort värmen från lasten under kylfasen.

Kapitel 3

Målsättning och Metoder

Målsättningen med examensarbetet är att optimera ugnprocessen med avseende på tiden. Detta kräver att man först identifierar och sedan reglerar processen som består av en uppvärmningsfas och en kylningsfas.

En modell för lasttemperaturen ska tas fram. Den ska ange hur temperaturen i lasten vid varje tidpunkt beror på ugnstemperaturen. Modellen ska användas för att avgöra när lasten har stelnat så att kylningen kan påbörjas. Simuleringar baserade på modellen ska visa om hålltider vid uppvärmningen kan förkortas.

Kylprocessen består av två delprocesser. En vakuumkylning och en snabbkylning. Vid vakuumkylningen står ugnslasten och självsvagnar tills den har uppnått en viss temperatur. Då snabbkylningen startar fylls ugnen till överttryck med kvävgas och en kylfläkt påskyndar avsvagningsförloppet. Skälet till vakuumkylningen är att kopparlodet ska stelna och att kylsystemet inte klarar av vattentemperaturerna som uppstår om man startar snabbkylningen direkt efter uppvärmningsfasen. Målsättningen är att genom reglering utnyttja snabbkylningen tidigare utan att det uppstår några problem med kylsystemet.

3.1 Målgrupp

Rapporten ska kunna läsas med full förståelse av en civilingenjör och med god behållning av intresserade medarbetare.

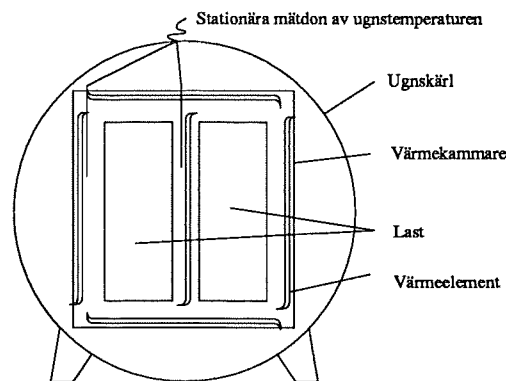
3.2 Utrustning

Arbetet har utförts med hjälp av en bärbar 486 *dx* dator av märket Dell. Matlab har använts som hjälpmedel under identifieringen. Mätutrustning för att logga data fanns ej då jag startade. Efter en marknadsundersökning bestämdes utrustningen skulle hyras från Intab i Klippan. Mätutrustningen gav möjlighet att kontinuerligt logga data på åtta kanaler. Man kunde också ställa fyra reläutgångar och detektera åtta reläingångar. Temperaturerna mättes med hjälp av termotrådar som var av typ-K och typ-S. Dessa har olika karakteristik beroende på temperaturintervall. Rapporten är skriven i \LaTeX .

Kapitel 4

Uppvärmningsfas

Ugnslasterna består av värmeväxlare och löds med rent koppar i en ugn av märket Schmetz som är ett tyskt fabrikat. Ugnskärlet är av stål och innesluter en värmekammare. Den isolerar värmen så att utbytet mellan element och last blir maximalt. Kammaren är uppdelad i två zoner för att bättre fördela värmen i lasten, se figur 4.1 .



Figur 4.1: Ugnen sedd i vy frammifrån. Ett kärl omsluter en värmekammare som ska isolera värmen. Två givare registrerar temperaturen. Lasten är uppdelad i två zoner.

Zonerna definieras av cirkulära värmelement som täcker varsin vägg. Dessa befinner sig mitt i ugnen, vid två av sidoväggarna, i taket och i botten av värmekammaren.

På två ställen i ugnen finns stationära temperaturgivare. De styr ugnsprogrammet. Givarna är av typ-S som tål hög temperatur och har god upplösning kring lödtemperaturen för koppar. Dessa givare har parallellkopplats och används för att mäta ugnstemperaturen.

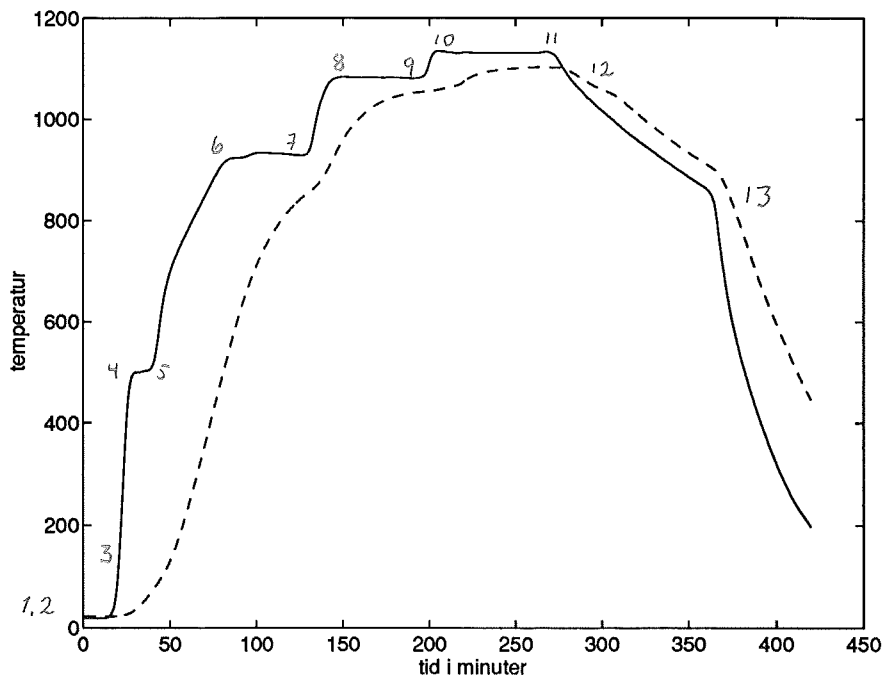
Då en ny ugnscykel ska påbörjas, placeras ugnslasten på ett ugnsgaller där man lämnar ett mellanrum i mitten för att möjliggöra zonuppdelningen. Växlarna placeras på ett förutbestämt sätt så att värmen sprids på bäst möjliga

sätt. Det finns fem olika storlekar på växlare. De kallas CB-14/CP400, CB-26/CP410, CB-51/CP415, CB-76/CP415 och CP-500.

4.1 Referenskurvan

Referenskurvan för temperaturen i ugnen under uppvärmningen är empiriskt utprovad genom mätningar av temperaturer i en testväxlare och diverse hållfasthetskrav, se figur 4.2 . Dess utseende är baserat på att lasten genomgår ett antal faser under uppvärmningen.

I styrprogrammet definieras referenstemperaturer som ugnen ska uppnå och hur länge temperaturen ska befinna sig där. Den befintliga regulatören reglerar strömmen till elementen så att temperaturen hålls rätt. Det som varierar från cykel till cykel är tiden det tar att uppnå dessa referenstemperaturer. Kyltiderna varierar också eftersom lasterna skiljer sig i storlek och sammansättning.



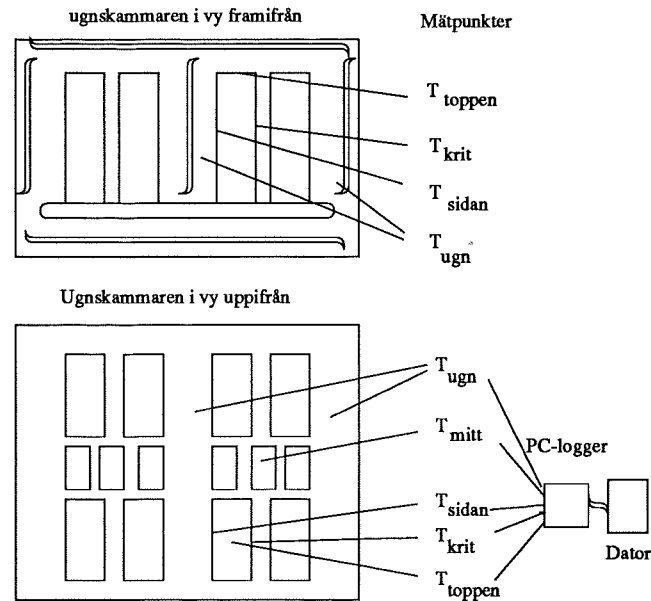
Figur 4.2: Temperatur i ugn (heldragen) och last (streckad) under en ugnscykel. Siffrorna anger olika hållpunkter.

För att få insikt i vad som händer i de olika faserna, ska ett antal hållpunkter i en testkörning diskuteras, se figur 4.2 .

1. Man börjar varje cykel med att sänka trycket i ugnen. Detta görs för att man vill bli av med syret i ugnen. Tryckkurvan har inte loggats.
2. Trycket är cirka $5 \cdot 10^{-2}$ mbar i ugnen. Detta tryck bör hållas under $5 \cdot 10^{-1}$ mbar, men utgasning av restprodukter som pressolja kommer att tillfälligt öka trycket. Då utgasningen är klar, minskar trycket igen.
3. Uppvärmningen påbörjas och lasten värms tills ugnen uppnår 500°C .
4. Hålltid. Temperaturen inuti lasten ska närma sig ugnstemperaturen och utgasningen av restprodukter påbörjas.
5. Ugnstemperaturen ökas till 920°C .
6. 920°C i ugnen. Hålltid. Temperaturen i lasten ska närma sig ugnstemperaturen och utgasningen fortsätter till viss del.
7. Utgasningen anses klar och ugnen har en ren atmosfär. Ett partialtryck med kvävgas sätts till 1 mbar. Detta förhindrar förångning av kopparn men det hindrar inte lödprocessen. Temperaturen höjs till 1080°C som är strax under kopparns lödtemperatur.
8. Hålltid. Man vill att lasten ska ha en homogen temperatur innan man går upp i lödtemperatur.
9. Temperaturen höjs till 1130°C .
10. Hålltid. Lastens temperatur stiger över 1083° som är smälttemperaturen för koppar.
11. Lödningen avslutas. Här är vi säkra på att kopparn har smält i hela lasten.
12. Vakuumkylningen påbörjas. Värmen stängs av och luckor öppnas i värmekammaren så att värmen strålar ut över ett större område och lasten självsvalnar tills kopparn har stelnat. Partialtrycket bibehålls.
13. Snabbkylning. Ugnen fylls med kvävgas till övertryck. Gasen cirkulerar och kyler lasten då fläkten startas. Värmen leds bort av ett vattenkylsystem.

4.2 Mätuppställning

För att kunna mäta temperaturen i lasten har olika mätpunkter loggats. Signalerna har tagits in i en PC-logger som styrs av en dator, se figur 4.3.



Figur 4.3: Principskiss över mätuppställningen då man loggar olika mätpunkter. En dator styr en PC-logger som registrerar data.

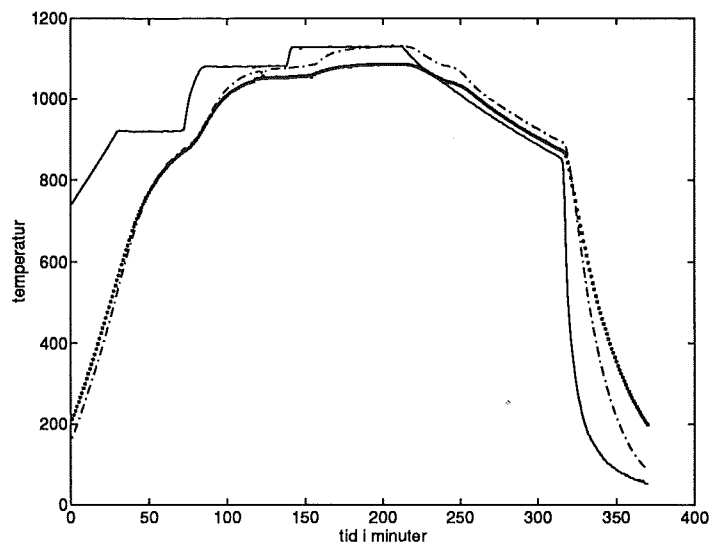
4.3 Inledande försök

Innan man försöker sig på någon modellering så måste man bestämma vilka mätpunkter som är intressanta. I vårt fall vill vi veta hur punkten som tar längst tid att värma upp beror på ugnens temperatur. Denna mätpunkt kan vara en av två möjliga kandidater, T_{krit} i CB-76 eller T_{mitt} i CB-26, se figur 4.3

Den vanligaste lasten består av CB-26 och CB-76 placerade enligt figur 4.3. Man gjorde mätningar i kasserade skrotväxlare.

Mätunkt T_{mitt} har svårast att öka temperaturen vid låga temperaturer och mätpunkt T_{krit} har svårast att öka vid höga temperaturer, se figur 4.4. Vi väljer punkt T_{krit} eftersom modellen ska ge den mest kritiska mätpunkten vid temperaturer nära koppars smältpunkt. Skälet till att det blivit denna punkt är att temperaturen är kraftigt beroende av strålningen och värmeledningen blir flaskhalsen vid höga temperaturer. Sträckan som värmeledningen ska utbreda sig, se b i figur 4.5, är större vid mätpunkten T_{krit} än i T_{mitt} . I fortsättningen gör vi bara mätningar i CB-76, d.v.s. T_{krit} .

Förutom den kritiska temperaturen har två yttemperaturer uppmätts.



Figur 4.4: Jämförelse av hur temperaturen i en last av typen CB-26 (prickad) och CB-76 (prick-streckad) beror av ugnstemperaturen (heldragen).

4.4 Modellering

Under uppvärmningsfasen sker ett värmeutbyte. Enligt termodynamikens andra huvudsats går värmets alltid från ett område med högre temperatur till ett område med lägre temperatur. Temperaturen är ett mått på den värmemängd en kropp innehåller. Värmeutbytet i vår process kommer att ske på två sätt, strålning och ledning, se figur 4.5. Strålningen är försumbar vid låga temperaturer men dominerande vid höga. Ugnslasten utsätts för strålning från värmeelementen. Denna strålning värmer upp ytan på lasten. Värmeledning sker in mot kallare område.

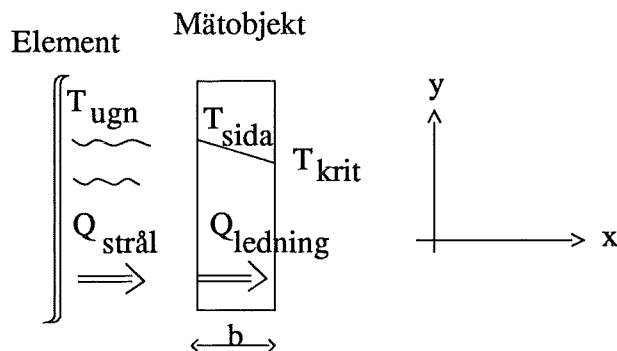
Strålning

Strålning är det värmeutbyte som sker genom elektromagnetiska vågor. Alla medier utsänder energi i form av strålning. Strålningen behöver inget materiellt medium för sin fortplantning. Den kan genomtränga materiella medier men absorberas därvid till en del, olika för olika ämnen. En kropp som absorberar all infallande strålning kallas en svart kropp. För att förenkla modelleringen antas att alla kroppar är svarta.

För att bestämma värmeutbytet på grund av strålning utgår vi från den värmemängd Q , som emitteras av en absolut svart kropp. Denna uppfyller Stefan-Boltzmanns lag

$$\dot{Q}_{stral} = A \cdot C_s \cdot T_{ugn}^4 \quad (4.1)$$

där A är arean hos den strålände kroppen, C_s är strålningstalet och T_{ugn} är den



Figur 4.5: Strålning och ledning

absoluta yttemperaturen hos den strålände kroppen.

Strålningstalet för en svart kropp, C_s , har värdet $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ men i verkligheten ingår det ett emissionsförhållande, ε . Detta beror på materialet, relativa ytstorlekar och inbördes läge på de strålände kropparna. Det är en koefficient som man måste identifiera fram.

Om flera kroppar utsättes för varandras strålning, kan värmeutbytet beskrivas med

$$\dot{Q}_{strali} = A_i C_s \sum_k F_{ik} (T_i^4 - T_k^4) \quad (4.2)$$

där A_i är den strålände väggens area, F_{ik} är en vinkelfaktor eller geometrisk faktor som definieras som andelen av strålningen från en yta som ankommer till en annan. Temperaturen T_i är den studerade väggens temperatur och T_k är temperaturen hos vägg $_k$.

Eftersom vi inte känner alla de strålände ytornas temperaturer, avgränsar vi oss till två ytor vars temperaturer vi kan mäta. Temperaturen T_{ugn} och vid sidan på värmeväxlaren, T_{sida} , se figur 4.5.

Vår approximation ger följande formel om $F_{12} = 1$

$$\dot{Q}_{stral} = A_i C_s (T_{ugn}^4 - T_{sida}^4) \quad (4.3)$$

Värmeledning

Värmeledning kallas det värmeutbyte som sker genom mikroskopiska rörelser, d.v.s. genom atom och molekylrörelser. Denna sker huvudsakligen i lasten.

Värmeledningen i stationäritet kan modelleras enligt följande: Betrakta figur 4.5. Väggen har tjockleken b och värmekonduktiviteten λ . Väggens temperaturer kallar vi T_{sida} och den kritiska temperaturen T_{krit} . Värmeledningen blir endimensionell, d.v.s. värme leds endast i x -riktningen. Värmeflödet genom väggen blir

$$\dot{Q}_{ledning} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (4.4)$$

vilket alternativt kan skrivas som

$$\dot{Q}_{ledning} = \frac{\lambda A}{b} (T_{sida} - T_{krit}) \quad (4.5)$$

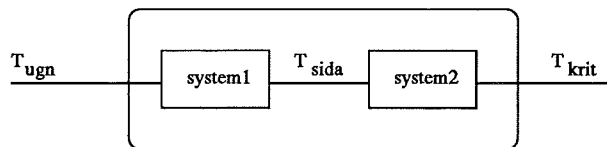
Det värmnet som träffar ytan på väggen absorberas och leds in i materialet. Om kropparna är svarta så kommer $\dot{Q}_{stralning} = \dot{Q}_{ledning}$. Vi kommer då slutligen att få sambandet

$$AC_s (T_{ugn}^4 - T_{sida}^4) = \frac{\lambda A}{b} (T_{sida} - T_{krit}) \quad (4.6)$$

Denna ekvation skriver vi om till

$$T_{krit} = T_{sida} - \frac{bC_s}{\lambda} T_{ugn}^4 + \frac{bC_s}{\lambda} T_{sida}^4 \quad (4.7)$$

Genom energibalanser har vi fått fram en ekvation, se ekvation (4.7), som beskriver hur T_{krit} beror på T_{ugn} och T_{sida} . Systemet kan beskrivas med figur 4.6.



Figur 4.6: Delsystemen

I bilden ovan ser vi att vi har en insignal, T_{ugn} , och en utsignal, T_{krit} . Temperaturen T_{sida} kan betraktas som inre tillstånd. Vi vill se hur T_{sida} beror på T_{ugn} för att på så sätt få ett SISO-system, single-input-single-output system. Problemet uppstår dock eftersom man inte kan uttrycka T_{sida} explicit i T_{ugn} . Man kan dock iterera fram T_{sida} genom att skriva om ekvation (4.7). Resultatet konvergerar mot rätt temperatur med ett randvillkor och ekvationen

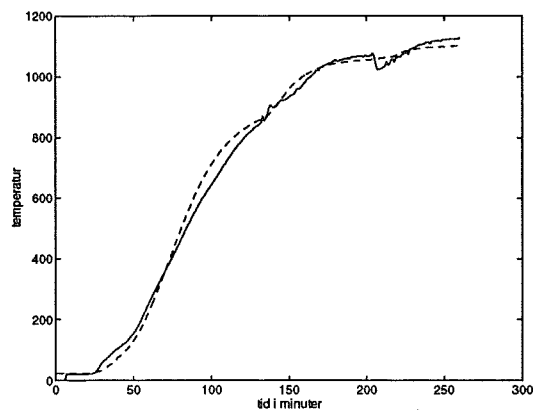
$$T_{sida(k+1)} = \left(T_{ugn(k)}^4 - \frac{T_{sida(k)} - T_{krit(k)}}{\frac{bC_s}{\lambda}} \right)^{1/4} \quad (4.8)$$

där man använder T_{krit} , som man egentligen inte har tillgång till, för att få fram T_{sida} .

Nu försöker vi modellera T_{krit} genom att använda ekvation (4.7). Koefficienterna fås fram med hjälp av minsta-kvadrat-metoden, där man väljer koefficienterna till modellen så att den kvadratiske avvikelserna mellan modellen och den verkliga utsignalen blir minimal.

4.5 Identifiering

Den fysikaliska modelleringen blev inte vad man hoppats på. Verkligheten är mer komplicerad än de modeller som satts upp. Det kommer strålning från alla ytor runt omkring. Då vi inte vet deras temperatur, kan vi inte heller använda de i en modell. Vidare så är värmekonduktiviteten beroende av temperaturen och modellerna är baserade på stationära förhållande.



Figur 4.7: Den fysikaliska modellens kritiska temperatur (streckad) jämförs med den verkliga (heldragen).

Vi studerade en linjär ARMAX-modell (AutoRegressive Moving Average with eXogenous input) för systemet $T_{ugn} \rightarrow T_{krit}$. ARMAX genererar en z-transform modell enligt

$$y_k = \frac{b_0 q^{-d} + \dots + b_{n_b} q^{-d-n_b}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}} u_k + \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}} w_k \quad (4.9)$$

där n_a , n_b och n_c är ordningen på polynomen och d är tidsfördröjningen. Modellordningen kan inte vara alltför hög eftersom excitationen i insignalen är liten. Mätningarna visade att d skulle vara 6 steg, vilket motsvarar 6 minuter. Modellerna som prövades:

n_a	n_b	n_c	n_k	Akaikes FPE
1	1	1	6	3.288
2	1	1	6	0.8203
3	1	1	6	0.7171
4	1	1	6	0.7898
2	2	1	6	0.81511
3	2	1	6	0.7225

Samplertiden var 60 sekunder.

Modellen valdes till th2116.

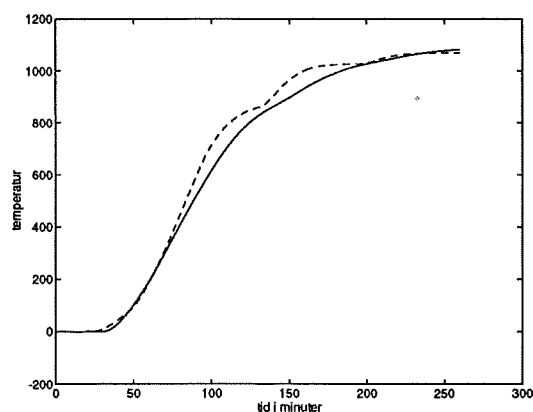
This matrix was created by the command ARMAX on 5/20 1995 at 10:31
 Loss fnc: 0.7955 Akaike's FPE: 0.8204 Sampling interval 60 sek
 The polynomial coefficients and their standard deviations are
 B=

0 0 0 0 0 0 0.0016

```

0 0 0 0 0 0 0.003
A=
1.0000 -1.9411 0.9427
0.0000 0.0118 0.0115
C=
1.0000 -0.5290
0.0000 0.0601

```



Figur 4.8: ARMAX modellens kritiska temperatur (heldragen) jämförs med den verkliga (streckad).

Eftersom modellen är olinjär i arbetsområdet, se formel (4.7), så är den linjära modellen inte särskilt bra. Olinjär identifiering med hjälp av Hammerstein modeller gav inte några bra resultat. Ett sätt att undvika olinjära modeller är att dela upp temperaturen i intervall, t.ex de olika stegen och ta fram linjära modeller för intervallen.

Överföringsfunktionerna uttryckta i bakåtskiftoperatorn blev:

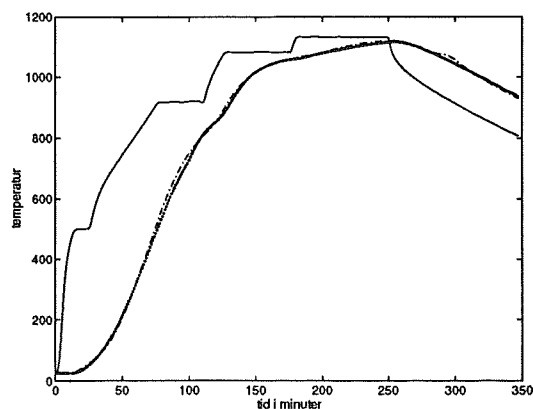
$$H_{20-500} = \frac{0.0039q^{-6} - 0.0034q^{-7}}{1 - 2.0131q^{-1} + 1.0144q^{-2}} \quad (4.10)$$

$$H_{500-920} = \frac{0.0567q^{-6}}{1 - 0.9427q^{-1}} \quad (4.11)$$

$$H_{920-1080} = \frac{0.0122q^{-6}}{1 - 0.9880q^{-1}} \quad (4.12)$$

$$H_{1080-1130} = \frac{0.0244q^{-6}}{1 - 0.9764q^{-1}} \quad (4.13)$$

Validering ses i figur 4.9.



Figur 4.9: Den styckvis linjära modellens kritiska temperatur (prickad) jämförs med den verkliga (streck-prickad). I figuren finns också ugnstemperaturen (heldragen).

4.6 Simulering

Vid varje mätning har modeller gjorts och den kritiska lasttemperaturen simulerats. Modellerna (4.10)-(4.13) är t.ex bara giltiga vid den speciella mätningen. Hade man gjort identifieringen baserat på en annan mätning hade man fått annorlunda koefficienter i överföringsfunktionerna. Resultatet av simuleringarna diskuteras i kapitel 4.7 .

4.7 Analys av uppvärmningsfasen

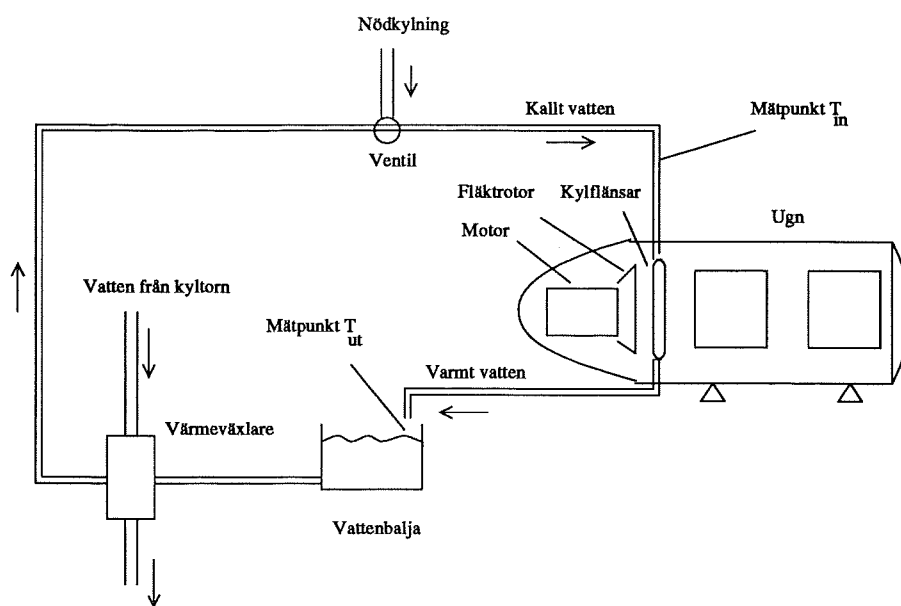
Under de mätningar som gjorts har alla laster varit uppe i lödtemperatur, även på det mest kritiska stället i lasten. Lödtiden har däremot varierat från ett par minuter till över 40 minuter. Eftersom man inte mäter laststorlekarna så kan man inte förkorta tiderna. I nuvarande lödsituation så är referenskurvan tidsoptimal.

Genom att väga och maximera lasterna till 2000 kg skulle man kunna förkorta uppvärmningsfasen med 20 minuter. Simuleringarna visar att lasttemperaturen vid de två sista stegen, se figur 4.2, ökar marginellt i slutet av stegen. Detta medför att vi kan minska tiden med 10 minuter på vardera steg och det påverkar knappt tiden som lasten befinner sig i lödning.

Kapitel 5

Kylningsfas

När uppvärmningsfasen är avslutad går man in i kylfasen. Den består av vaku-
umkylning och snabbkylning. Se punkt 10-12 i avsnitt 4.1.



Figur 5.1: Principskiss över kylsystemet

Vid vakuumpkylningen är trycket 1 mbar. Man låter systemet stå stilla och det som sker är att två luckor i värmekammaren öppnas. Detta så att värmen kan stråla ut i hela kärlet. Denna process är långsam men nödvändig. Ugnstemperaturen sjunker och kopparn stelnar. Värmen leds bort av kylsystemet. Verkningsgraden för värmetransporten är liten eftersom fläkten står stilla.

Då ugnstemperaturen har nått 850°C startar snabbkylningen. Ugnen sätts i övertryck av kvävgas för att konvektionskyla lasten då fläkten startar. Fläkten har tre hastigheter, noll, långsam och snabb. Vid långsam fläkt roterar den 1500

varv per minut och vid snabb fläkt 3000 varv per minut. Dess maximala effekt är 110 kW. Luckorna till värmekammaren är öppna och två stycken flärpar styr gasflödet omväxlande vänster- och höger-varv i ugnen. Den varma gasen kyls av en ringkylare där vattnet cirkulerar med ett flöde av 1000 liter per minut.

Det uppvärmda vattnet som lämnar ugnen hamnar i en bassäng. Denna rymmer cirka 2000 liter vatten. Härifrån går vattnet till fyra värmeväxlare där värmen växlas mot det kallare vattnet som kommer från ett kyltorn. Kyltornet är ett slutet system där vattnet går upp i slingor på taket och kyls av. Detta är säsongsberoende, men eftersom det svenska vädret oftast är mellangrätt så blir kyleffekten relativt konstant.

Kraven på vattentemperaturen är fastställda för att motverka ångbildning i ringkylaren. Om vattnet, som strömmar in i ugnen, är varmare än 32°C så startas det en nödkylning. Detta innebär att man utjämnar vattentemperaturen genom att öppna en ventil så att kallt kommunalt vatten strömmar direkt in i kylsystemet. Nödkylning är en icke önskvärd effekt ty vattnet som cirkulerar är behandlat mot korrosion och det vill man inte blanda med kommunalt nödkylningsvatten. Dessutom blir vattenkostnaderna höga. Vatten som lämnar ugnen ska vara svalare än $75 - 80^{\circ}\text{C}$ för att minimera slitage på packningar och lager.

Idag sker ingen hastighetsreglering av fläkten. För att undvika nödkylning har man väntat med att starta snabbkylningen tills ugnstemperaturen är under 850°C . Man börjar då med att först köra man långsam fläkt och sedan snabb fläkt, se figur 5.11. Många gånger lyckas man undvika nödkylning men inte alltid. Av mina 10 icke-reglerade mätningar uppstod nödkylning 3 gånger.

Tiden för vakuumpkylningen är varierande. Vanligtvis tar det en timme och 40 min. Ugnstemperaturen är då 850°C och lasttemperaturen 900°C . Det optimala i tidshänseende vore om man kunde starta snabbkylningen precis då lasten stelnat och samtidigt undvikt nödkylning. Detta skulle innebära att vakuumpkylningen skulle kunna kortas runt en timme.

Vid kylfasen är vi intresserade av både lasttemperaturen och kylvattentemperaturen. Vi kommer att göra två modelleringar. Den första syftar till att kunna följa temperaturen i lasten och den andra ska användas i regleringssyfte.

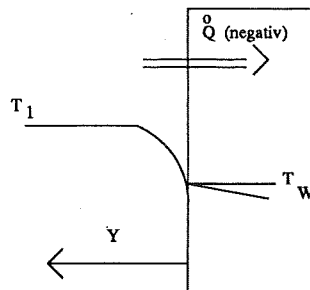
5.1 Mätuppställning

På samma sätt som man mätte temperaturen i lasten vid uppvärmningsfasen mäter man hur temperaturen varierar i lasten under kylningsfasen se figur 4.3. Vi är också intresserade av hur kylvattentemperaturen beror av tiden, ugnstemperaturen och fläkthastigheten. Med detta i åtanke loggar vi data enligt figur 5.5.

5.2 Modellering av lasttemperatur

Vid avkylningsförloppet i ugnslasten sker s.k. forcerad konvektiv avkylning. Värmeutbytet mellan en strömmande fluid och en fast vägg sker i ett relativt tunt skikt närmast väggen.

Intill väggytan $y=0$, är strömningshastigheten alltid noll. Värmeffödet \dot{Q}



Figur 5.2: Konvektiv uppvärmning. En fluid strömmar runt objektet och värmen överförs genom värmeledning.

måste transporteras gemon ledning. För en väggyta A gäller då

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dy}_{y=0} \quad (5.1)$$

Här är λ värmekonduktiviteten för fluiden och $\frac{dT}{dy}_{y=0}$ temperaturgradienten vid väggen. Storleken av gradienten bestäms av strömningens utseende i gränsskiktet samt av fluidens egenskaper. I praktiken är det svårt att bestämma värmeutbytet genom att mäta temperaturgradienten och man sätter därför i stället

$$|\dot{Q}| = \alpha A (T_l - T_w) \quad (5.2)$$

där α kallas värmeövergångskoefficient. Den beror av strömningen och mediets egenskaper och varierar från punkt till punkt på en kropp. Ofta använder man medelvärdet för en yta.

Att identifiera fram något bra resultat baserat på modelleringen kan vara besvärligt eftersom luftflödet ändrar riktning i ugnen med hjälp av flärparna och detta i sin tur påverkar α . Ekvationen (5.2) är alltså en mycket förenklad bild av verkligheten och kommer inte att användas i identifieringen.

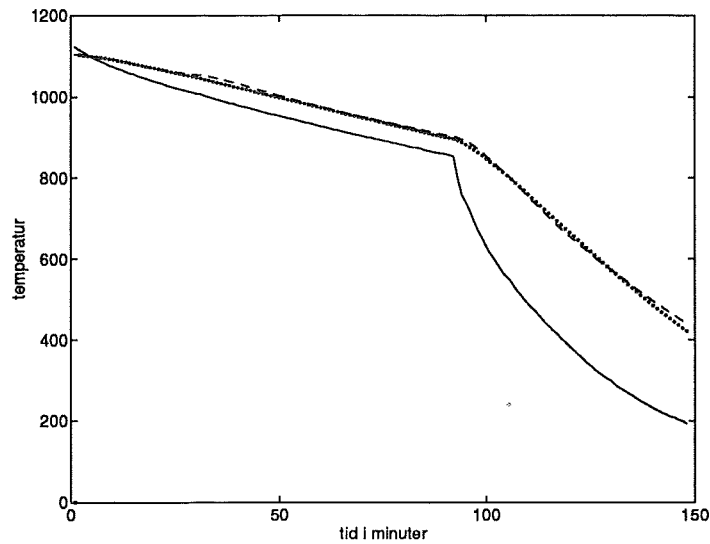
5.3 Identifiering av lasttemperaturen

En första ordningens linjär modell identifierades fram.

$$H_{kyllning} = \frac{0.030q^{-3}}{1 - 0.969q^{-1}} \quad (5.3)$$

5.4 Modellering av kylvattentemperatur

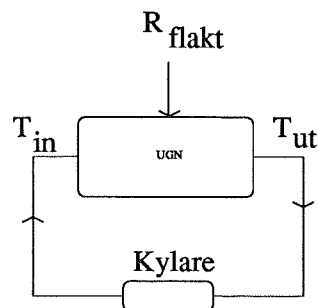
En modell för kylsystemet ska användas för att styra en kylfläkt som påverkar kylvattentemperaturen. Denna fläkt är en asynkron motor. För att styra den kontinuerligt så behövdes en frekvensomvandlare. Motorn är så kraftig att kostnaden för att inhandla en sådan överskred examensarbetets budget. Försök gjordes att hyra en sådan utrustning men inget företag nappade på den idén. Med detta i åtanke bestämdes att sekvensstyrning skulle användas.



Figur 5.3: Den linjära modellens kritiska temperatur (prickade) jämförs med den verkliga (streckade). I figuren syns också ugnstemperaturen (heldragen).

5.5 Identifiering av kylvattentemperaturen

Modellen för kylvattentemperaturen kommer inte att användas eftersom regleringen är begränsad till on/off reglering. Till en eventuell framtida användning studeras vissa förutsättningar nedan.



Figur 5.4: Kylsystemet och signaler

Förhållanden som gäller ses nedan.

1. $T_{ut} = G_1 T_{in} + G_2 R_{fläkt}$
2. $T_{in} = G_3 T_{ut}$

Sammanlaget blir detta

$$T_{ut} = \frac{G_2}{1 + G_1 G_3} R_{fläkt} \quad (5.4)$$

Temperaturerna T_{ugn} och T_{last} kan betraktas som inre tillstånd. Man måste identifiera alla överföringsfunktionerna var för sig. Problem kan uppstå då man vill isolera en ekvation så att den bara beror på en insignal. Punkt 1 ovan är besvärlig att identifiera. För att bestämma G_2 måste man bryta återkopplingen så att T_{in} inte påverkar T_{ut} . Om man tillför vatten i vattenbaljan, se figur 5.1, så att T_{in} blev konstant, kunde man identifiera T_{ut} . Problemet är att vatten strömmar i så stora mängder att detta inte är praktiskt genomförbart.

För att bestämma överföringsfunktionen G_3 så har vi provar ett antal olika modeller. Andra ordningens ARMAX-modell, se ekvation (4.9), ger bra resultat vid validering. Tidsförskjutningen, d , uppmättes till 18 sekunder, d.v.s tre sampelperioder.

För att denna modell ska vara giltig så antar vi att T_{ut} inte påverkas av T_{in} utan av andra parametrar som ugnstemperaturen och fläkthastigheten.

This matrix was created by the command ARMAX on 6/19 1995 at 2:28

Loss fcn: 0.2229 Akaike's FPE: 0.2485 Sampling interval 6 sek

The polynomial coefficients and their standard deviations are

B =

0.0375

0.0057

A =

1.0000 -0.8372 -0.0549

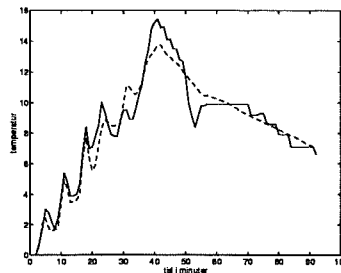
0.0000 0.1684 0.1561

C =

1.0000 0.2266

0.0000 0.1255

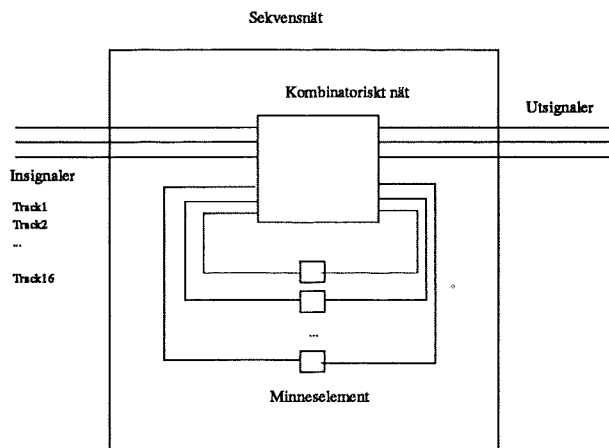
$$H(q)_3 = \frac{0.0375q^{-3}}{1 - 0.8372q^{-1} - 0.0549q^{-2}} \quad (5.5)$$



Figur 5.5: Modellens temperatur (sträckade) jämföres med den verkliga T_{in} (heldragen). Initialtemperatur har tagits bort.

5.6 Ugnens styrsystem

Ugnens styrsystem är ett PLC-program som är utvecklat av Simens och kallas step-5. Detta består av ett sekvensnät som ser som



Figur 5.6: Ugnens styrsystem.

Sikvensnätet består av minneselement, kombinatoriskt nät, insignaler och utsignaler, se figur 5.6. Det kombinatoriska nätet är uppbyggt av ochgrindar, ellergrindar och ickegrindar.

Insignalerna, som kallas Track1-Track16, specificeras i ett ugnsprogram, se figur 5.7 .

tid	temp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
00:00:00	25	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
00:20:00	25	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
00:50:00	500	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figur 5.7: Ugnsprogram som specificerar sikvensnätets insignaler.

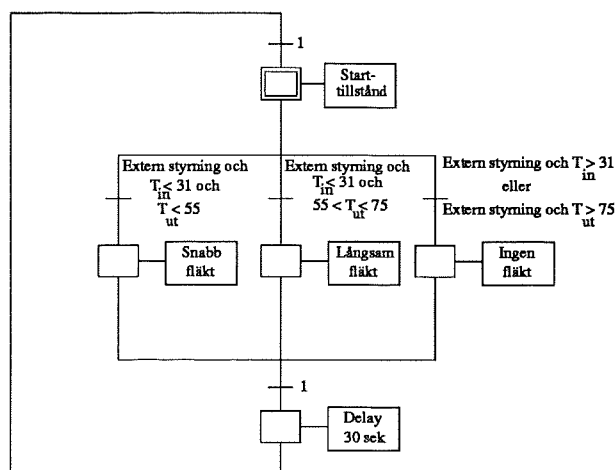
Varje nummer motsvarar ett så kallat track som har olika betydelse. En etta i kolumnen motsvarar att denna händelse är aktiv, annars inaktiv. Tiden och temperaturen innebär att händelsen börjar eller fortgår tills båda villkor är uppfyllda. De olika trackens betydelse ses i tabellen nedan.

1. Hålltid och Hålltemperatur. Programmet fortsätter inte förrän båda dessa villkor är uppfyllda.
2. Kylning.
3. Partialtryck regleras.

4. Gradvis steg-värmning.
5. Härdningskylning.
6. Laststyrning
7. Gaskylning eller Vakuumkylning.
8. Gaskylning från vänster.
9. Gaskylning från höger.
10. Gaskylning växelvis från båda håll.
11. Kylfläkten snabb eller långsam.
12. Partialtryck statistiskt.
13. Inaktiv.
14. Inaktiv. (Enable)
15. Inaktiv.
16. Program slut.

5.7 Reglering

Ett PLC-program kan i vårt fall representeras grafiskt som ett *Grafcet nät* bestående av steg, övergångar och starttillstånd. Ett steg motsvarar ett tillstånd, se figur 5.8, och kan vara aktivt eller inaktivt. Övergångarna knyter samman stegen och är associerade med ett villkor då övergången får ske. Vår reglerstrategi ges av figur 5.8 .



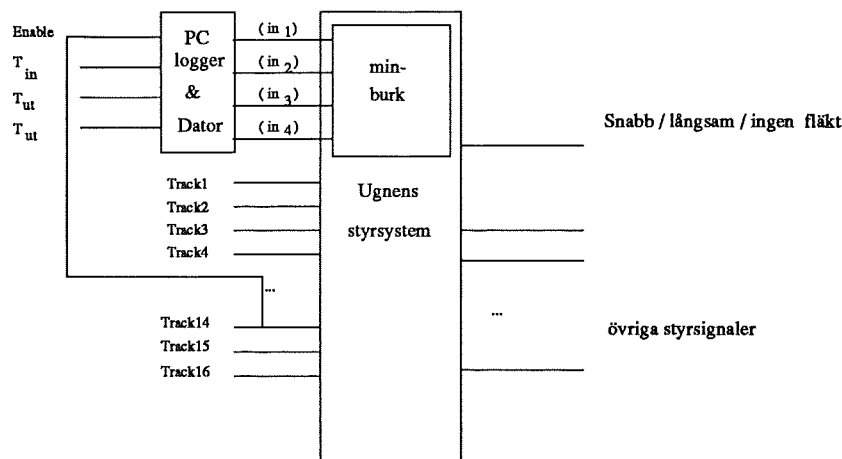
Figur 5.8: Reglerstrategi för styrning av ugnens fläkt.

Så länge systemet får styras med hjälp av externa signaler så ska man testa villkoren och bestämma fläkthastigheten. Om $T_{in} \geq 31$ eller $T_{ut} \geq 75$ så ska fläkten stå stilla. Temperaturen T_{ut} bestämmer om fläkten ska gå långsamt eller snabbt.

För att kunna köra fläkten i de olika hastigheterna, måste man påverka händelserna, se tabell i kapitel 5.6, enligt följande:

Fläkt hastighet	Händelser
Snabb	$\bar{7} \wedge 10 \wedge 11$
Långsam	$7 \wedge 10 \wedge 11$
Noll	$7 \wedge \bar{10} \wedge \bar{11}$

Ugnens styrsystem var inte förberätt för extern styrning så för att möjliggöra reglering måste man modifiera det befintliga styrsystemet. Det nya styrsystemet ser vi i figur 5.9 .

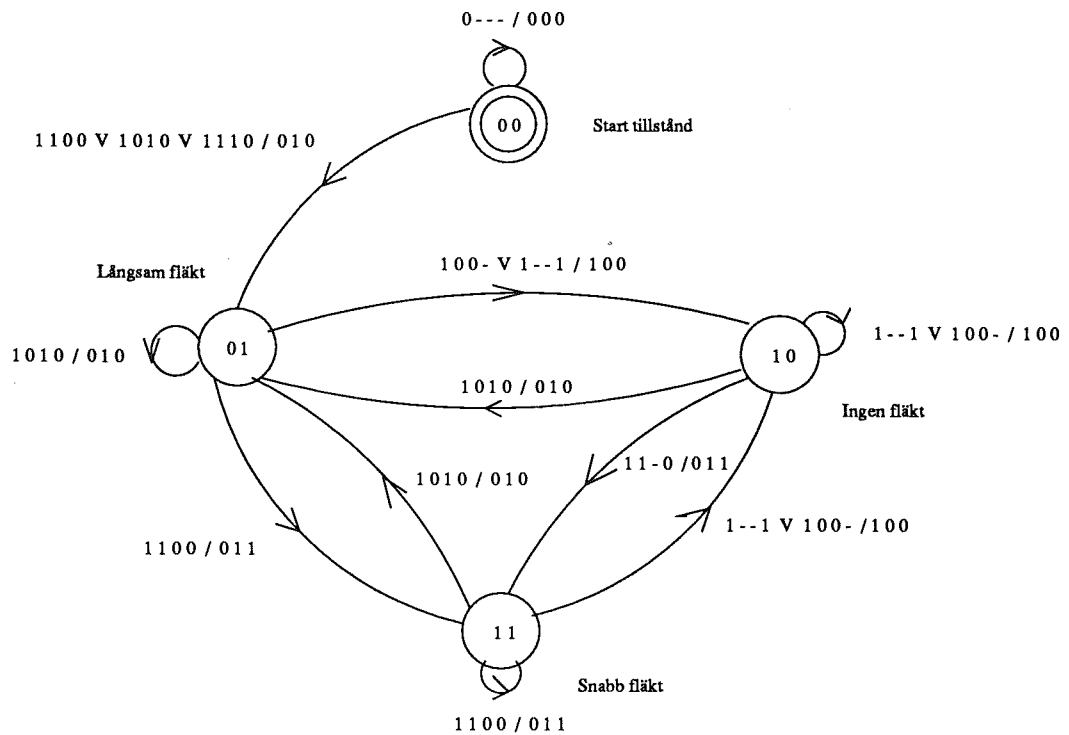


Figur 5.9: Nya styrsystemet där min7, min10 och min11 ersätter Track7, Track10 och Track11. Minburk är ett sekvensnät nät.

För att implementera detta i ugnens PLC-program bygger man en sekvensnät, se figur 5.6, kallad minburk. De återkopplande minnen är SR-vippor. Maskinens insignaler och dess tillstånd bestämmer vilka utsignaler som den ska ge. Enable-signalen talar om för systemet att det ska välja gränssnittets förprogrammerade värde eller min7, min10 och min11 som är utsignalerna från minburk. Enable-signalen är vald till track 14. Om track 14 är satt så styrs fläkten externt. Eftersom vi enligt figur 5.8 har tre disjunkta område för T_{ut} så behöver vi två stycken mätvariabler att skilja dem åt. Insignalerna till maskinen sätts enligt följande:

- in_1 Hög om extern styrning
- in_2 Hög om T_{ut} mellan 0-55
- in_3 Hög om T_{ut} mellan 55-75
- in_4 Hög om T_{in} över 31

Tillståndsgrafan är ritad som en Mealy-maskin där utsignalen beror på aktuell insignal och aktuellt tillstånd, se figur 5.10. Starttillståndet är markerat med två ringar. Signalerna på bågarna betecknar insignal/utsignal där utsignalerna blir insignaler till ugnens styrsystem.



Figur 5.10: Tillståndsgrafan som realiserar reglerstrategin, se figur 5.8

Vi har fyra tillstånd. Starttillstånd, långsam fläkt, snabb fläkt och noll fläkt. Då vi startar, vill vi oberoende av vad temperaturena är vid de olika mätpunkterna att fläkten ska gå till tillståndet långsam fläkt. Detta eftersom man inte vill chocka kylsystemet och komma i ringning, d.v.s. omväxlande snabb fläkt och noll fläkt. Om man inte först går till långsam fläkt kommer minburk, se figur 5.9, vilja styra ut snabb fläkt eftersom $T_{in} < 31^{\circ}\text{C}$ och $T_{ut} < 55^{\circ}\text{C}$. Detta kommer att leda till att T_{in} överstiger 80°C och det nya styrsystemet kommer att välja noll fläkt. Eftersom vi vill ha en mjukare start och att vi har en tidsfördröjning att ta hänsyn till så går vi alltid från starttillståndet till långsam fläkt.

Det behövs två stycken tillståndsvariabler för att koda tillstånden. Ur tillståndsgrafan, se figur 5.10, kan man se vilka villkor som måste vara uppfyllda för att maskinen ska byta tillstånd. Tillståndsbyte kan bara ske var trettionde sekund, så ofta som vi läser av T_{ut} och T_{in} . Ugnen och mätutrustningen har olika samplingsfrekvenser. Detta blir inga problem eftersom ugnen läser av sina signaler betydligt oftare. Samplingsfrekvensen hos mätutrustningen är vald till

30 sekunder eftersom det inte är bra för fläkten att behöva ändra hastighet alltför ofta.

Arbetsgången för att komma fram till ett färdigt nät är följande:

1. Bestäm med hjälp av den kodade tillståndstabellen hur de enskilda tillståndsvariablerna ska ändras för olika insignalkombinationer.
2. Använd SR-vippans syntestabell för att bestämma vilka insignaler som vipporna ska påverkas med för att åstadkomma de önskade tillståndsövergångarna.
3. Bestäm förenklade funktionsuttryck för vippornas insignaler.

För den intresserade finns utredningen i appendix A. Resultatet redovisas nedan.

$$\text{min7} = (q_0 \wedge in_4) \wedge (q_1 \wedge in_4) \vee (in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge \overline{in_3})$$

$$\text{min10} = (in_1 \wedge in_3 \wedge \overline{in_4}) \vee (in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

$$\text{min11} = (q_0 \wedge in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_4}) \vee (q_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

$$S_0 = (in_1 \wedge in_4) \vee (q_1 \wedge in_1 \wedge \overline{in_3})$$

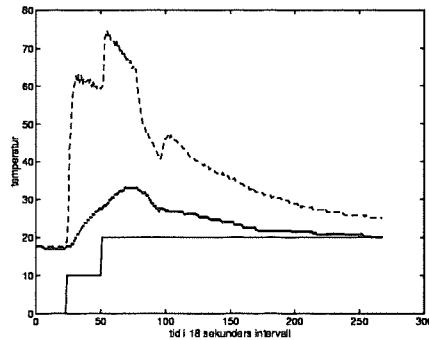
$$R_0 = (q_0 \wedge in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge in_3 \wedge \overline{in_4})$$

$$S_1 = (in_1 \wedge in_3 \wedge \overline{in_4}) \vee (in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

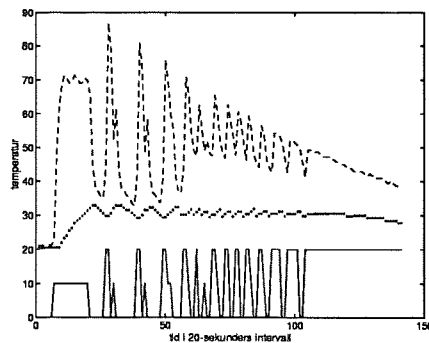
$$R_1 = (in_4) \vee (in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge \overline{in_3})$$

5.8 Resultat av regleringen

Innan regleringen kunde resultaten av kylprocessen variera beroende på om lasten var stor eller liten. Laster som innehöll stor värmekapacitet, d.v.s. stora laster, orsakade ofta nödkylning, se figur 5.11 . Nu slipper man nödkylning.



Figur 5.11: Vattentemperaturer i kylsystemet. Här har nödkylning skett. Den prickade kurvan är T_{in} , den sträckade är T_{ut} och den heldragna motsvarar fläktens hastighet.



Figur 5.12: En reglerad snabbkylning. Den prickade kurvan är T_{in} , den sträckade är T_{ut} och den heldragna motsvarar fläktens hastighet.

Tiden är också en viktig faktor. Tidigare har vakuumkylningen tagit cirka 1 timme och 40 minuter men nu avbryter man den efter 40 minuter för att börja snabbkylningen. Detta är möjligt eftersom man reglerar vattentemperaturerna.

Ett problem är att den asynkrona motorn till fläkten utsätts för större slitage. Man kan komma runt detta genom att använda en frekvensomvandlare. Då kan man köra fläkten i alla hastigheter mellan 0 och 3000 varv/minut istället för 0, 1500 eller 3000 varv/minut..

Kapitel 6

Slutsatser

En av lärdomarna som jag har dragit under våren är att det krävs en del hel av praktiskt arbete för att kunna göra något teoretiskt. Mycket tid har blivit lagd på att få fram utrustning och skapa en bra mätsituation.

Den fysikaliska modelleringen har inte blivit tillfredställande. Identifieringen har istället gjorts baserat på ARMAX-modeller. Goda resultat fås om man använder olika modeller i olika temperaturintervall. Problemet blir att validera modellen på en annan ugnskörning. Förutsättningarna är inte lika vid olika körningar eftersom vikten och lasttypen varierar för mycket. En stor last tar längre tid att värma upp och en last med t.ex många CB-14 (mer ytareor) absorberar strålningen bättre.

Reglering av fläkten har medfört snabbare kylning. Detta påverkar hållfastheten positivt. Kornstorleken blir mindre vilket gör materialet segare. Kylvatentemperaturerna har blivit jämnare, d.v.s. man har sluppit de värsta topparna runt 90°C och 32°C. Detta gör att man slipper nödkylning och cykeltiden har minskat ungefär 50 minuter.

Litteraturförteckning

- [1] Cedervall, Mats och Lindh, Göran *Digitalteknik* Studentlitteratur AB. Lund 1992.
- [2] Johansson, Rolf *System modeling and identification* Engelwood Cliffs, NJ 1993
- [3] Åström, Karl-Johan och Wittenmark, Björn *Computer controlled systems* Prentice Hall International, Inc. , Lund 1991
- [4] Sunden, Bengt *Kompendium i värmeöverföring* Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Tillämpad termodynamik och strömningslära, Publikation nr 88/7
- [5] *Referens Guide* the Math works Inc. , Natic Mass 1992
- [6] *För IBM PCs och Kompatibler* Intab Interface-Teknik AB v7.4x, Klippan 1993
- [7] *Hårdvara med tillbehör* Intab Interface-Teknik AB v7.4x, Klippan 1993

Bilaga A

A.2 Utsignalen

$$\text{min7} = (q_0 \wedge in_4) \wedge (q_1 \wedge in_4) \vee (in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge \overline{in_3})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	0	0

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	-	0

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	0	0	0	-
01	0	0	-	-
11	0	0	-	-
10	0	0	0	0

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	-	0

$$\text{min10} = (in_1 \wedge in_3 \wedge \overline{in_4}) \vee (in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	1	1

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	-	1

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	0	0	1	-
01	0	0	-	-
11	0	0	-	-
10	0	0	1	1

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	-	1

$$\text{min}11 = (q_0 \wedge in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_4}) \vee (q_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	1	0

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	1	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	1	0

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	0	0	0	-
01	0	0	-	-
11	0	0	-	-
10	0	0	0	0

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	1	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	-	0

A.3 Nästa tillståndsfunktionen

$$S_0 = (in_1 \wedge in_4) \vee (q_1 \wedge in_1 \wedge \overline{in_3})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	-	-
01	-	-	-	-
11	-	-	-	-
10	-	-	-	0

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	-	-
01	-	-	-	-
11	-	-	-	-
10	-	-	-	0

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	0	0	0	-
01	0	0	-	-
11	0	0	-	-
10	0	0	0	0

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	-	0

$$R_0 = (q_0 \wedge in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge in_3 \wedge \overline{in_4})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	0	1

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	0	1

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	-	-
01	-	-	-	-
11	-	-	-	-
10	-	-	-	0

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	-	0

$$S_1 = (in_1 \wedge in_3 \wedge \overline{in_4}) \vee (in_1 \wedge in_2 \wedge \overline{in_3} \wedge \overline{in_4})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	1	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	1	1

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	0	0

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	0	0	1	-
01	0	0	-	-
11	0	0	-	-
10	0	0	1	1

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \setminus in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	0
01	-	-	0	0
11	-	-	0	0
10	-	-	0	0

$$R_1 = (in_4) \vee (in_1 \wedge \overline{in_2} \wedge \overline{in_3})$$

$q_0 q_1 = 10$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	-
01	-	-	-	-
11	-	-	-	-
10	-	-	0	0

Handwritten annotations: A circle around the cell (00, 10) with a '2' next to it. A horizontal line under the row (01, 11) with a '1' next to it.

$q_0 q_1 = 11$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	-	0

Handwritten annotations: A circle around the cell (00, 10) with a '2' next to it. A horizontal line under the row (01, 11) with a '1' next to it.

$q_0 q_1 = 00$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	-
01	-	-	-	-
11	-	-	-	-
10	-	-	0	0

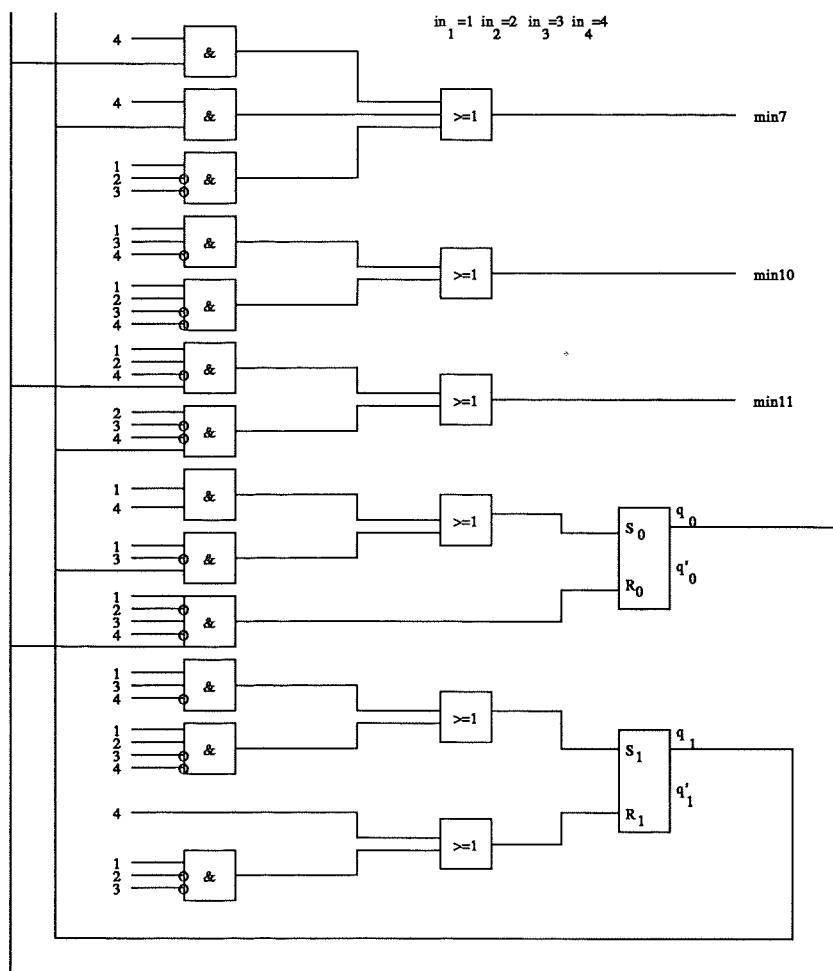
Handwritten annotations: A circle around the cell (00, 10) with a '2' next to it. A horizontal line under the row (01, 11) with a '1' next to it.

$q_0 q_1 = 01$

$in_3 in_4 \backslash in_1 in_2$	00	01	11	10
00	-	-	0	1
01	-	-	1	1
11	-	-	1	1
10	-	-	-	0

Handwritten annotations: A circle around the cell (00, 10) with a '2' next to it. A horizontal line under the row (01, 11) with a '1' next to it.

A.4 Hela grindnätet



Figur A.1: Realisering av den framtagna regulatorn.

A.5 Signaländringar

Det modifierade ugnsprogrammet har nummer 31. Man kan använda detta program även om man inte styr fläkten externt genom att inte sätter track 14 (enable).

Signalerna track7, track10 och track11 går genom ett filter som avgör om ugnen styrs externt eller 'vanligt'. Utsignalerna från dessa filter har benämningarna m31.0, m31.1 och m 31.2 . Dessa ingår i ett antal programblock istället för track7, track10 och track11. Följande ändringar har gjorts:

Track	Ändring	Programmblock
7	E 10.6 → m 31.0	71.1 71.2 71.3 71.4 71.5 74.2
10	E 11.1 → m 31.1	26.3 26.4 71.1 71.2 71.3 71.4 71.5 74.2
11	E 11.2 → m 31.2	73.2 73.3 73.4 73.5

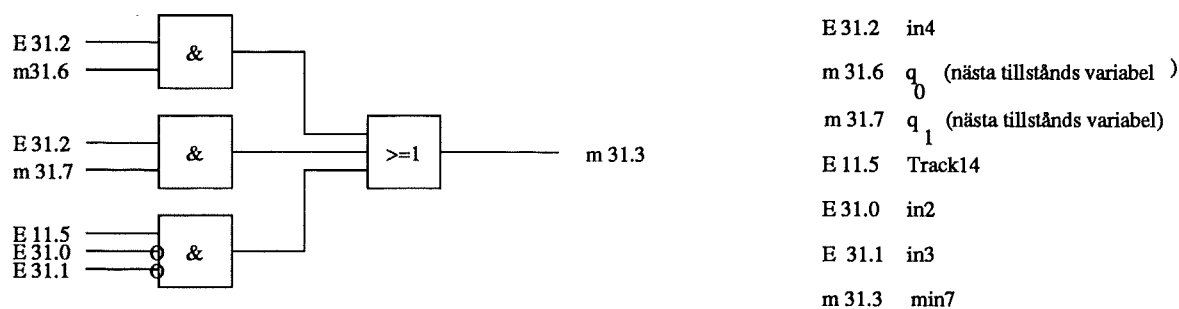
A.6 Användning av regleringen

För att kunna använda reglering så måste man bygga om försöksupställningen till ett mer robust och stationärt system. Mätpunkterna måste stadigfästas.

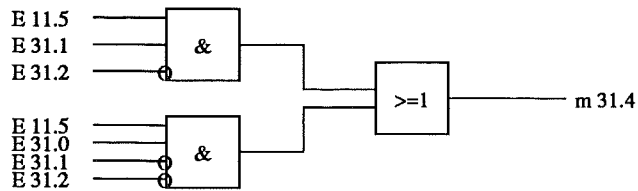
PC-loggern kopplas in i datorn och programmet startas med kommandot *aac* vid prompten *c : \aac1*. Programmet är enkelt att använda med hjälp av rullgardinsmenyer. Under menyn *Starta* så hittar man bl.a undermenyerna *Kanalval* och *Parametrar*. Här väljer man de olika relänivåerna som styrs av T_{in} och T_{ut} signalerna. Samplingstiden sätts också här.

A.7 Implementering i styrprogrammet

Ugnsprogrammet 31 är samma som 21 men med tillägg för extern styrning. Nätet är uppdelat på små programblock som redovisas nedan.

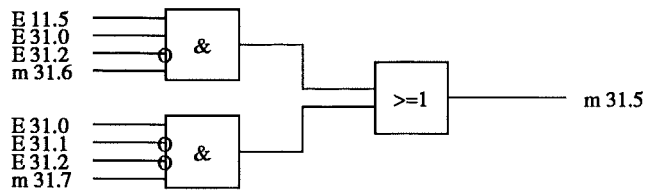


Figur A.2: PB 73.13



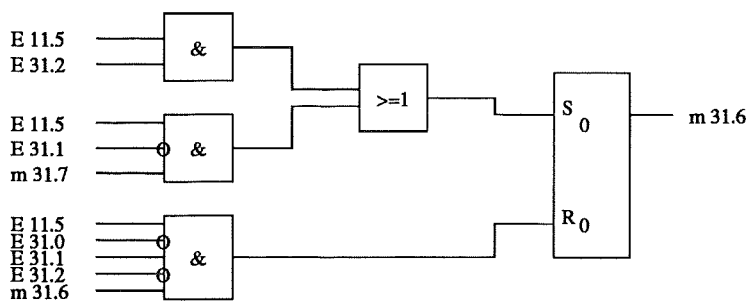
E 31.2 in4
 m 31.6 q_0 (nästa tillstånds variabel)
 m 31.7 q_1 (nästa tillstånds variabel)
 E 11.5 Track14
 E 31.0 in2
 E 31.1 in3
 m 31.4 min10

Figur A.3: PB 73.14



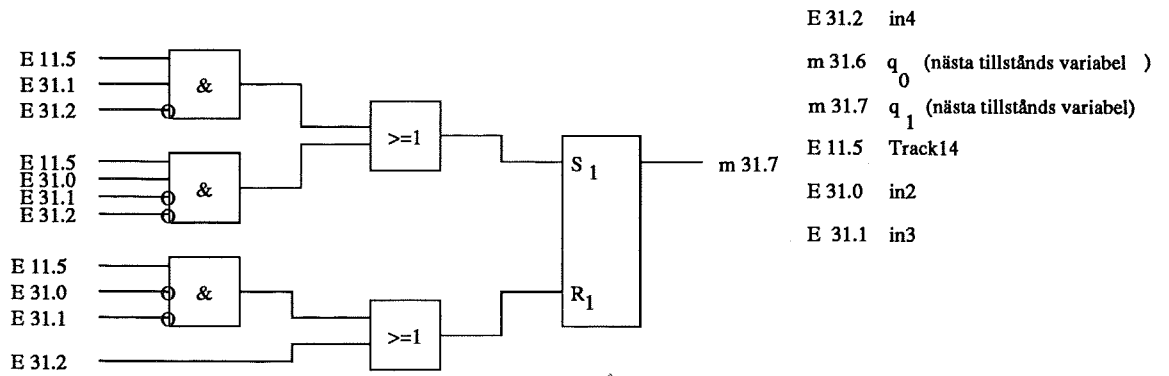
E 31.2 in4
 m 31.6 q_0 (nästa tillstånds variabel)
 m 31.7 q_1 (nästa tillstånds variabel)
 E 11.5 Track14
 E 31.0 in2
 E 31.1 in3
 m 31.5 min11

Figur A.4: PB 73.15

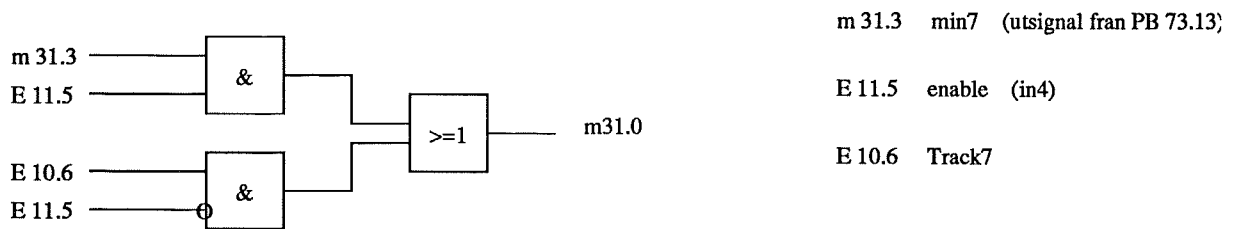


E 31.2 in4
 m 31.6 q_0 (nästa tillstånds variabel)
 m 31.7 q_1 (nästa tillstånds variabel)
 E 11.5 Track14
 E 31.0 in2
 E 31.1 in3

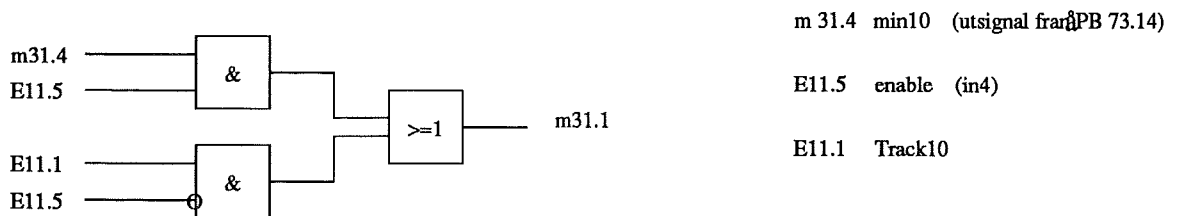
Figur A.5: PB 73.16



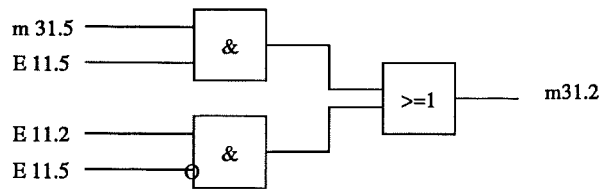
Figur A.6: PB 73.17



Figur A.7: PB 73.18



Figur A.8: PB 73.19



m 31.1 min7 (utsignal fran PB 73.15)
 E 11.5 enable (in4)
 E 11.2 Track11

Figur A.9: PB 73.20