MODELL AV EN MALKVARN

RICHARD NILSSON

RE-106 MARS 1972

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET
UTLÅNAS EJ

5106

M O D E L L A V E N M A L K V A R N

Examensarbete utfört av Richard Nilsson.

Ansvarig handledare Björn Wittenmark.

Institutionen för regleringsteknik
Lunds Tekniska Högskola 1972

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete omfattar bestämningen av en matematisk modell för en cementkvarn. Modellen som skall användas för att reglera temperaturen på den färdigmalda cementen skall därför visa på vad och hur denna temperatur beror.

Tillvägagångssättet för att få fram modellen har varit följande.

A. Först studerades kvarnen helt teoretiskt och med hjälp av fysikaliska samband kunde en temperaturjämviktsekvation uppställas. Genom uppskattningar bestämdes sedan de olika koeffecienterna i jämviktsekvationen och detta gav som resultat en teoretisk modell.

B. För att förbättra noggrannheten på koeffecienterna utfördes därefter en del praktiska försök och en systemidentifiering. Resultatet här blev en modell av samma struktur som den teoretiska men med betydligt noggrannare koeffecienter.

C. För att få en uppfattning om modellens tillförlitlighet gjordes en del simuleringar på en analogimaskin. Dessa visade att man har svårt att bestämma modellen exakt då de yttre ständigt varierande förhållandena (t.ex. omgivningens temperatur) ändrar modellens koeffecienter en del. Modellen visar emellertid tydligt hur och vilka flöden i kvarnen som påverkar temperaturen.

ABSTRACT

This master-thesis comprise how to determine a mathematical model of a cement-mill. The model which is to be used for regulating the temperature of the ready-ground cement therefore should show on what and how this temperature depend.

The course of action to get hold of the model has been as follow.

A. First the mill was theoretically studied. Using physical connections it was possible to put up a temperature-equation of equilibrium. The different coefficients of the equation of equilibrium then was fixed through estimations and the result of this was a theoretical model.

B. In order to achieve better precision of the coefficients some practical experiments and a system identification were done. This resulted in a model of the same structure as the theoretically but with considerable better accuracy of the coefficients.

C. To get an idea of the reliability of the model some simulations were done on an analog computer. The simulations indicated that it was difficult to get a model that is valid all the time. This because the changes in the environment apparently influence on the parameter values. However the model clearly shows how and which flows that influence the temperature.

I N N E H Å L L

		sid.
1.	INLEDNING	4
2.	PROCESSEN I KVARNEN	
2.1	Vattenkylningen och vindsikten.	6
2.2	De olika flödena i kvarnen.	7
2.3	Det befintliga reglersystemet.	10
2.4	Illustration av processens dynamiska beteende.	12
3.	PROBLEMSTÄLLNINGEN	16
4.	EN TEORETISK MODELL FÖR KVARNEN	
4.1	Jämviktsekvationen.	17
4.2	Konstanternas teoretiska värden.	19
4.3	Termernas storlek.	21
4.4	Jämförelse mellan den teoretiska modellen och uppmätta beteende.	22
5.	EXPERIMENT OCH IDENTIFIERING	
5.1	Krav och begränsningar på experimenten.	24
5.2	Experimentens utförande.	25
5.3	Identifieringen.	31
5.4	Jämförelse mellan den teoretiska och den genom identifiering framtagna modellen.	35
6.	SIMULERING PÅ ANALOGIMASKIN	37
7.	SLUTSATSER	47
	APPENDIX	49

1. INLEDNING

Avsikten med detta examensarbete, vars praktiska bakgrund är hämtad från AB Cementa i Limhamn, var att med hjälp av teoretiska studier och praktiska försök få en uppfattning om hur en malkvarn uppför sig ur reglerteknisk synvinkel.

Den speciella sorts malkvarn som det här är frågan om är en cementkvarn, i vilken man maler samman huvudsakligen gips och klinker så att färdig cement bildas. Både gips och klinker har vid ingången i kvarnen en fast stenliknande form med en maximal storlek ungefär som ett vanligt hönsägg. Dessa "stenar" skall alltså krossas och malas så att de får den färdiga cementens mjölliknande konsistens.

Cementkvarnen har formen av ett tjockt rör (diam. 3,8 m, längd 12 m) som till en tredjedel är fyllt med malkroppar bestående av stålkulor och cylpebs. (Cylpebs har formen av en kort cylinder till skillnad från kulorna).

Klinkerna och gipset matas in i ena ändan av kvarnen och när denna roterar slår malkropparna sönder klinkerna och gipset. Cementen förflyttar sig så framåt i kvarnen under ständig malning tills att den slutligen tas ut vid den andra ändan.

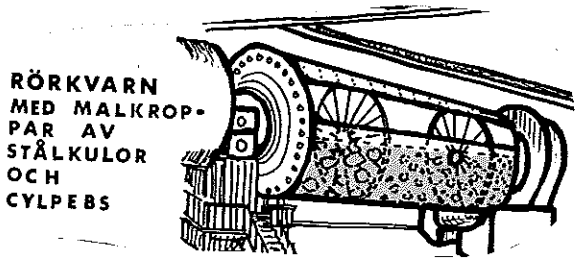


Fig. 1.

Vidare kan nämnas att kvarnen drivs av en motor på 2,43 MW, att själva kvarnen väger 185 ton och att malkropparna väger c:a 174 ton. Genomloppstiden för cementen är enligt uppgift c:a 40 min. och i medeltal finns det c:a 38,5 ton cement innuti kvarnen.

2. PROCESSEN I KVARNEN

2.1 Vattenkylningen och vindsikten

Vid malningen i cementkvarnen bildas mycket värme och då cementen undergår en del icke önskvärda kemiska reaktioner om temperaturen vid kvarnutloppet överstiger 130°C, har man för att hålla sig under denna temperatur blivit tvungen att spruta in kylvatten i kvarnen. Den praktiska utformningen av detta framgår av figur nr 2.

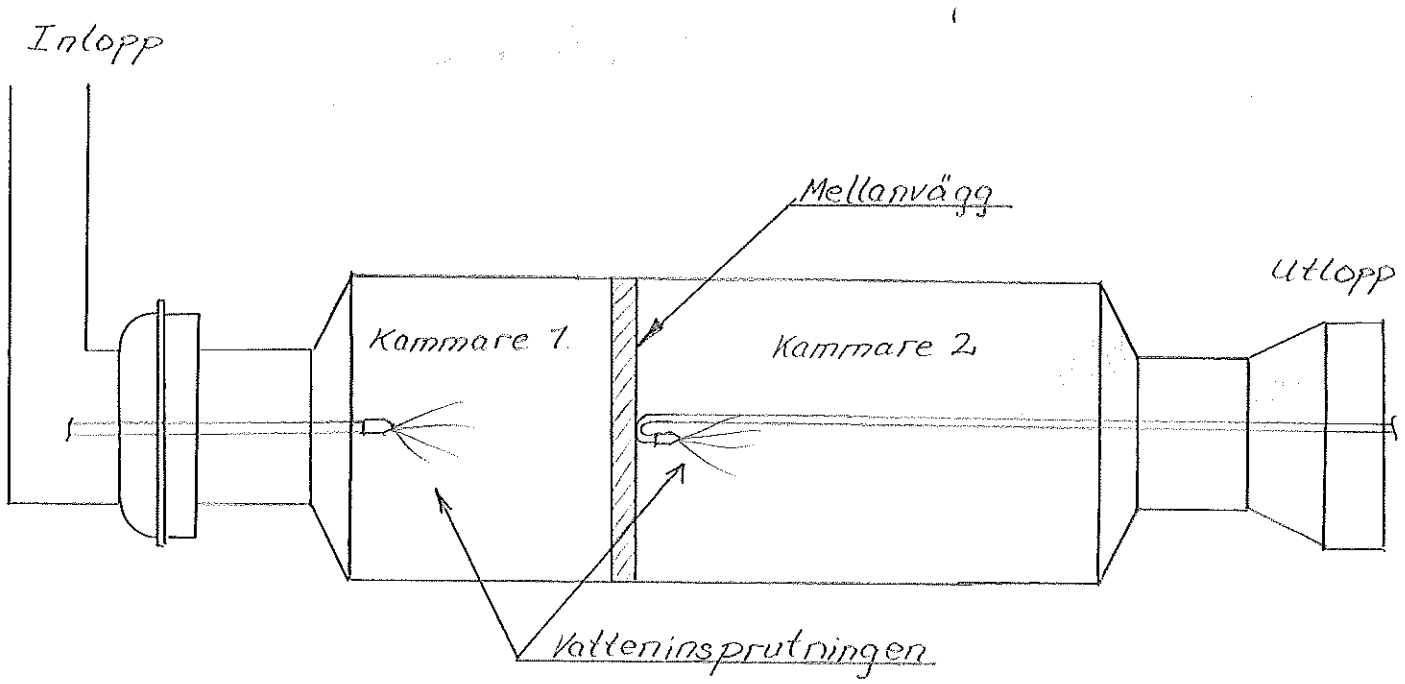


Fig. 2. Vatteninsprutningens utseende i cementkvarnen.

Emellertid innebär kylvattenarrangemanget också att man inte kan underskrida 100°C vid kvarnutloppet. Detta för att vara säker på att allt kylvattnet har förångats bort så att cementen inte innehåller någon fukt.

Då den ur kvarnen utkommande cementen inte har en exakt homogen partikelstorlek, låter man den passera igenom en vindsikt som sorterar ut de partiklar som är för stora och skickar dessa i retur till kvarnen för ommalning. Principen för detta framgår av figur nr 3.

2.2 De olika flödena i kvarnen

Totalt inmatas i genomsnitt 200 ton material i timmen. Detta kan uppdelas i 2 delflöden nämligen

A. Nyflödet

B. Returflödet

A. Nyflödet uppgår i genomsnitt till 60 ton/$_h$ och sammansättningen är följande:

93 % klinker (spec. värme = 0,75 J/$_{g.grad}$)
4 % gips
3 % filterdamm

Temperaturen på detta flöde kan ligga i intervallet från utomhustemp. upp till 90°C, men normalt är temperaturen mellan 70 och 80°C.

B. Returflödet består av material som gått igenom kvarnen en gång men ej blivit tillräckligt finmalt, utan åker i retur från vindsikten. Detta flöde uppgår i genomsnitt till 140 ton/$_h$. Temperaturen följer i viss mån utloppstemperaturen i kvarnen men svängningar i denna dämpas en del i vindsikten och i genomsnitt torde returflödestemperaturen vara c:a 90°C.

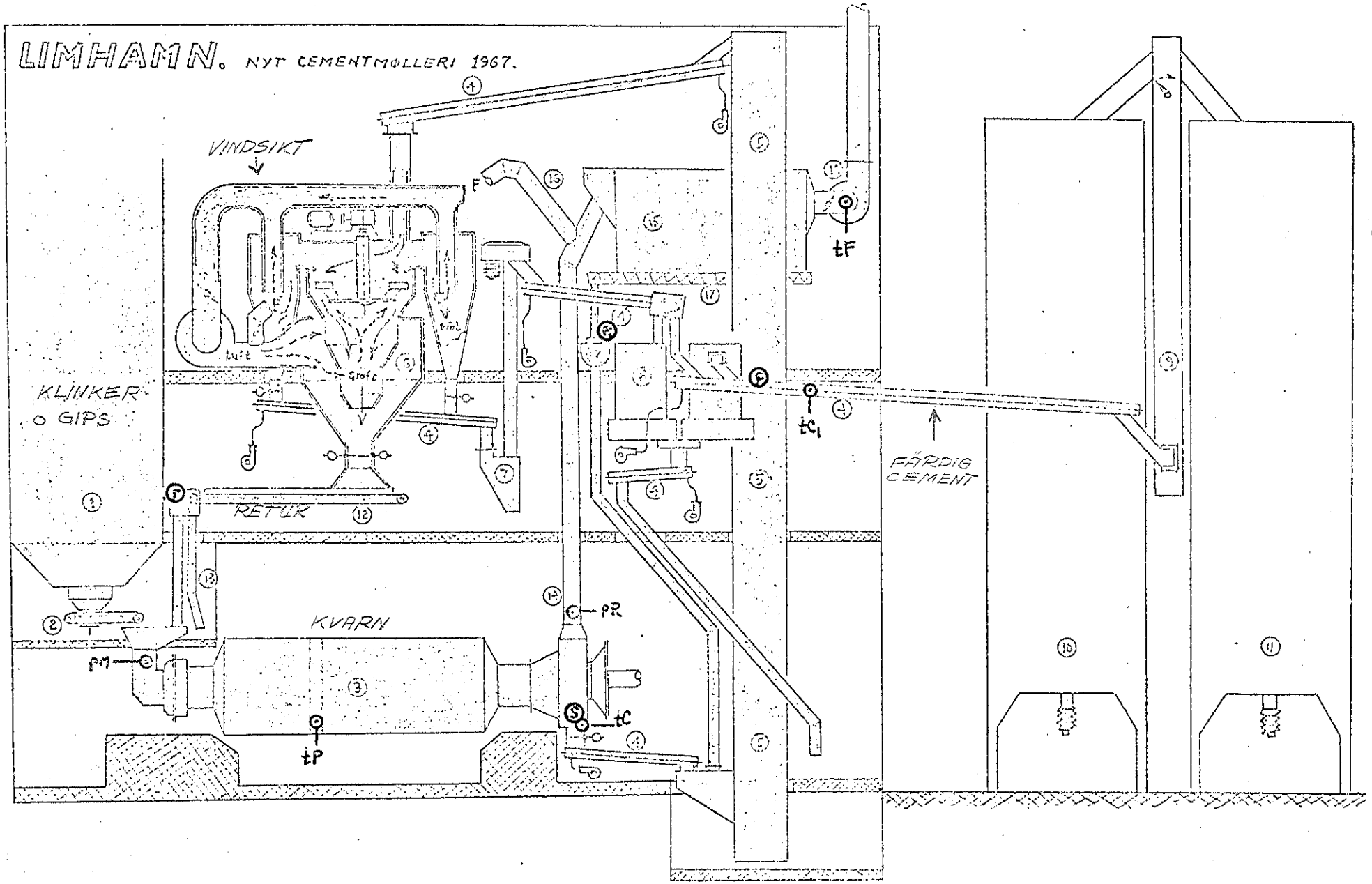

LIMHAMN. NYT CEMENTMØLLERI 1967.
VINDSIKT
KLINKER
O GIPS
RETUR
KVARN
FÄRDIG
CEMENT
tF
tC1
pR
pM
tP
tC

Fig. 3.

Specifika värmet är detsamma som för klinker
d.v.s. 0,75 $J/_{g.grad}$

Vidare användes i genomsnitt 2,4 m^3 vatten/$_h$ för den tidigare omtalade kylningen. Temperaturen på detta är 5 - 15°C. Allt detta vatten omvandlas till ånga och avgår som sådan och inget binds alltså till cementen.

Energin som tillföres kommer från motorn och den är på 2.430 KW. Hur mycket av detta som tillföres själva kvarnen vet man ej, men med tanke på att verkningsgraderna för lager och växellådor är relativt höga torde, när man räknat bort förlusterna för dessa, säkerligen 90 % tillföras kvarnen som ombildar denna till värme. Detta värme fördelas då på följande tre storheter.

1. Höjning av temperatur klinker - cement.
2. Förångning av kylvattnet.
3. Värmeledning och strålning genom och från kvarnens mantel och foder.

Vidare kan man utan större förlust anta att nyflödet består endast av klinker, ty dessa upptar ju 93 % och måste bli helt dominerande.

De olika flödena och temperaturerna kommer i fortsättningen att betecknas enligt nedanstående tabell.

Slag	Beteckning för flödet (kg/s)	Beteckning för temp. (°K)
Totala flödet in	Q_T	T_T
Returflödet	Q_R	T_R
Nyflödet (klinker)	Q_K	T_K
Kylvattenflödet	Q_A	T_A
Flödet i kvarnutloppet	Q_U	T_U

Vidare betecknas den från motorn överförda effekten till kvarnen med $\underline{P} = \beta \cdot 2.430.000$ (W) (β = verkningsgraden = 0,9).

Den effekt som går förlorad genom värmeledning och strålning betecknas med E (W)

Figur nr 4 ger då en sammanfattning av de olika flödena i kvarnen.

2.3 Det befintliga reglersystemet

Kvarntemperaturen styres av två stycken PID regulatorer. Systemet fungerar på så sätt att den ena regulatorn har temperaturen vid mellanväggen (se fig. nr 2) som insignal. Om denna signal avviker för mycket från en temperaturreferens ger regulatorn en utsignal till en servoventil som ökar eller minskar på vattenflödet genom det munstycke som sitter i kvarninloppet (se fig. nr 2). Den andra regulatorn fungerar på samma sätt och har utloppstemperaturen som insignal och styr det vattenflöde som går genom munstycket vid mellanväggen (se fig. nr 2).

Temperaturreferenserna som skall ställas in på regulatorerna väljes på följande sätt. Utloppstemperaturens referens väljes inom det tidigare omtalade intervallet t.ex. till 110°C. Man kan sedan med hjälp av figur nr 5 avläsa lämplig mellanväggsreferens.

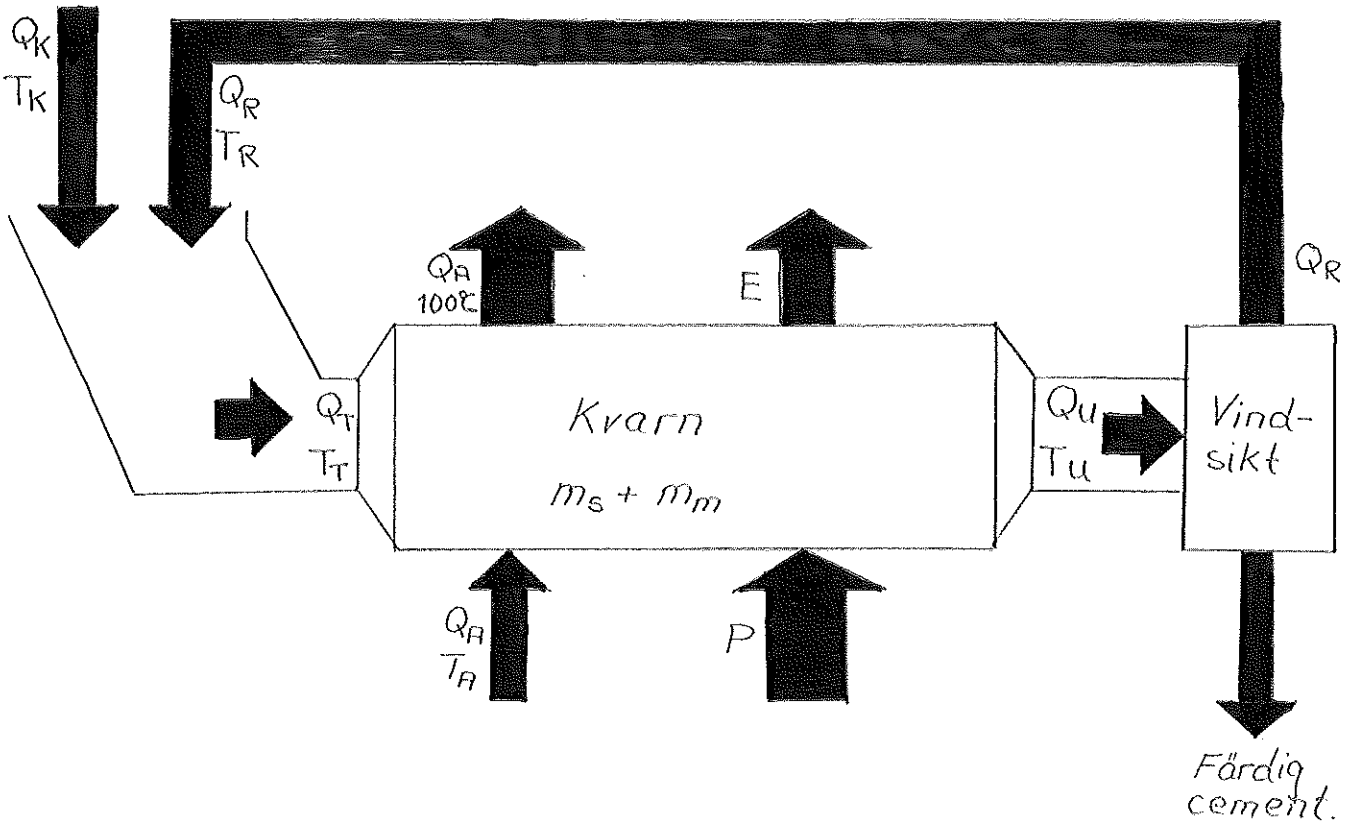


Fig. 4. De olika flödena i kvarnen.

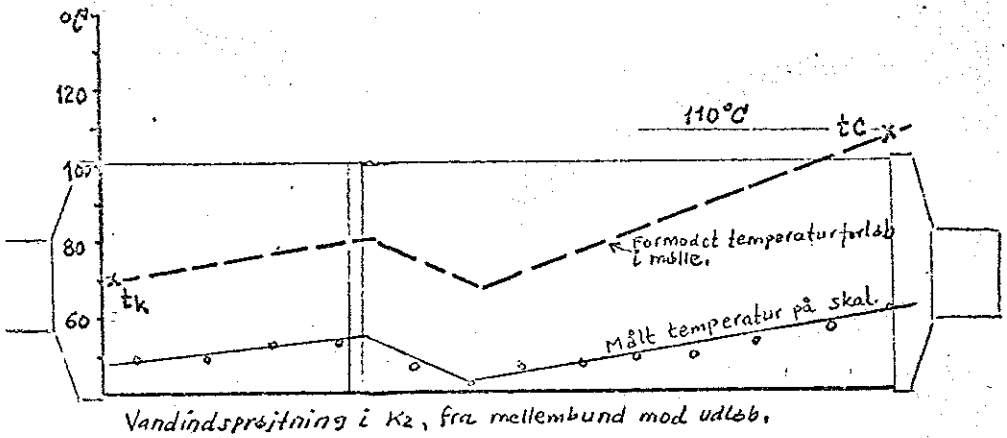


Fig. 5.

2.4 Illustration av processens dynamiska beteende

På de följande sidorna återfinnes några brottstycken av de kontrollremsor som kontinuerligt registreras.

Fullt utslag betyder för T_U 200°C, för Q_R 200 ton/h och 100 ton/h för Q_K. Tyvärr saknas här information om en av de viktigaste storheterna nämligen Q_A. Detta medför att man inte med säkerhet kan förklara de olika beteendena.

De dokumenterade signaler av intresse som är med på remsorna är

1. Utloppstemp. = T_U
2. Returflödet = Q_R
3. Nyflödet = Q_K
4. Fyllnadsgraden

Den sista, fyllnadsgraden, är en mycket brusig signal och visar endast tendensen, man kan således inte avläsa någon exakt fyllnadsgrad.

Det mest karakteristiska på remsorna är att T_U för det mesta kommer in i en stabil självsvängning (se figur nr 6). Amplitud och frekvens håller sig konstant i flera dygn och svängningarna upprepar sig i det närmaste identiskt. Svängningstiden rör sig om c:a 1,5 - 2 tim.

Då vattenflödet ej är registrerat är det svårt att säga vad som påverkar vad men en sak syns emellertid tydligt och det är att varje nedgång i temp. möts av ett ökat returflöde.

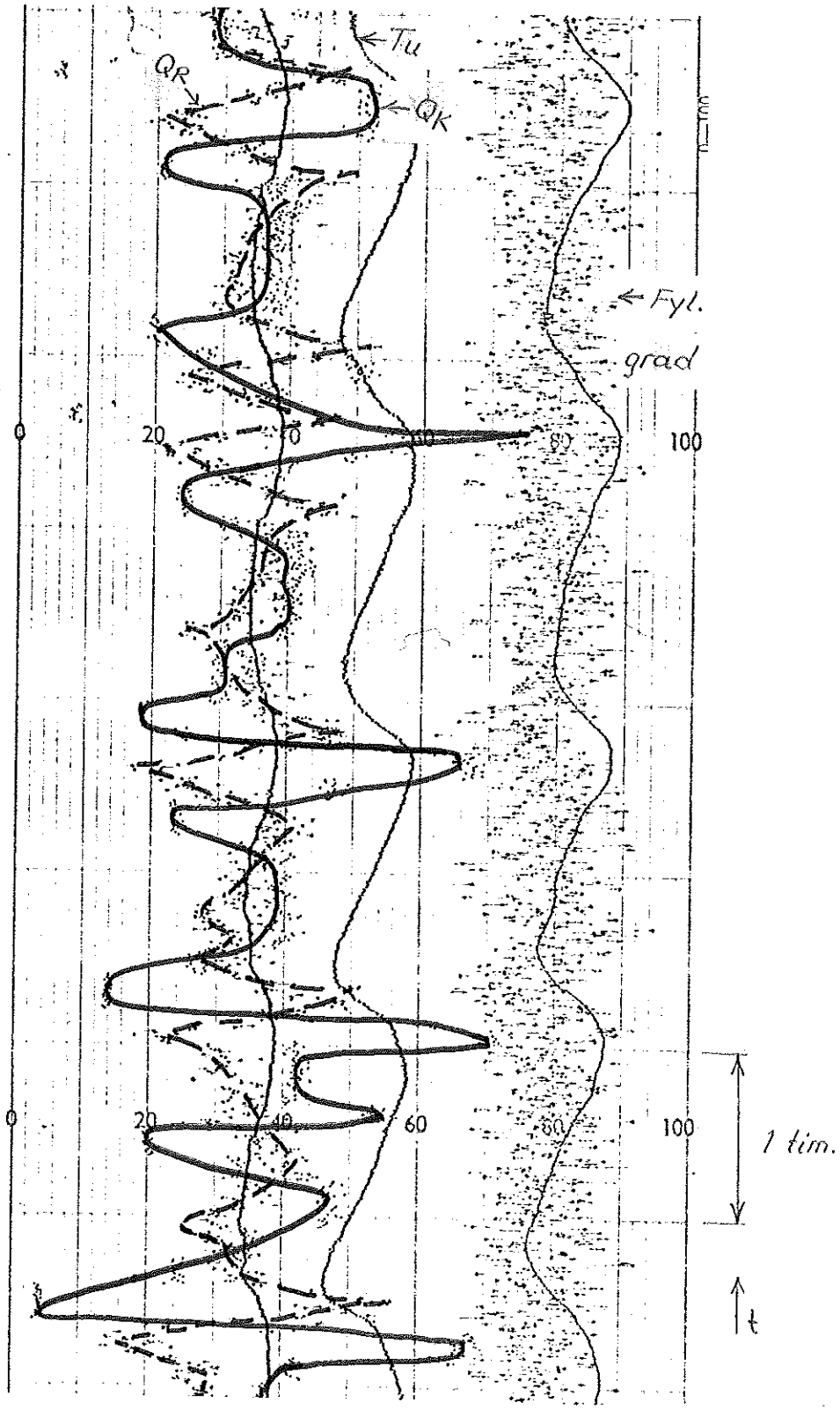


Fig. 6.

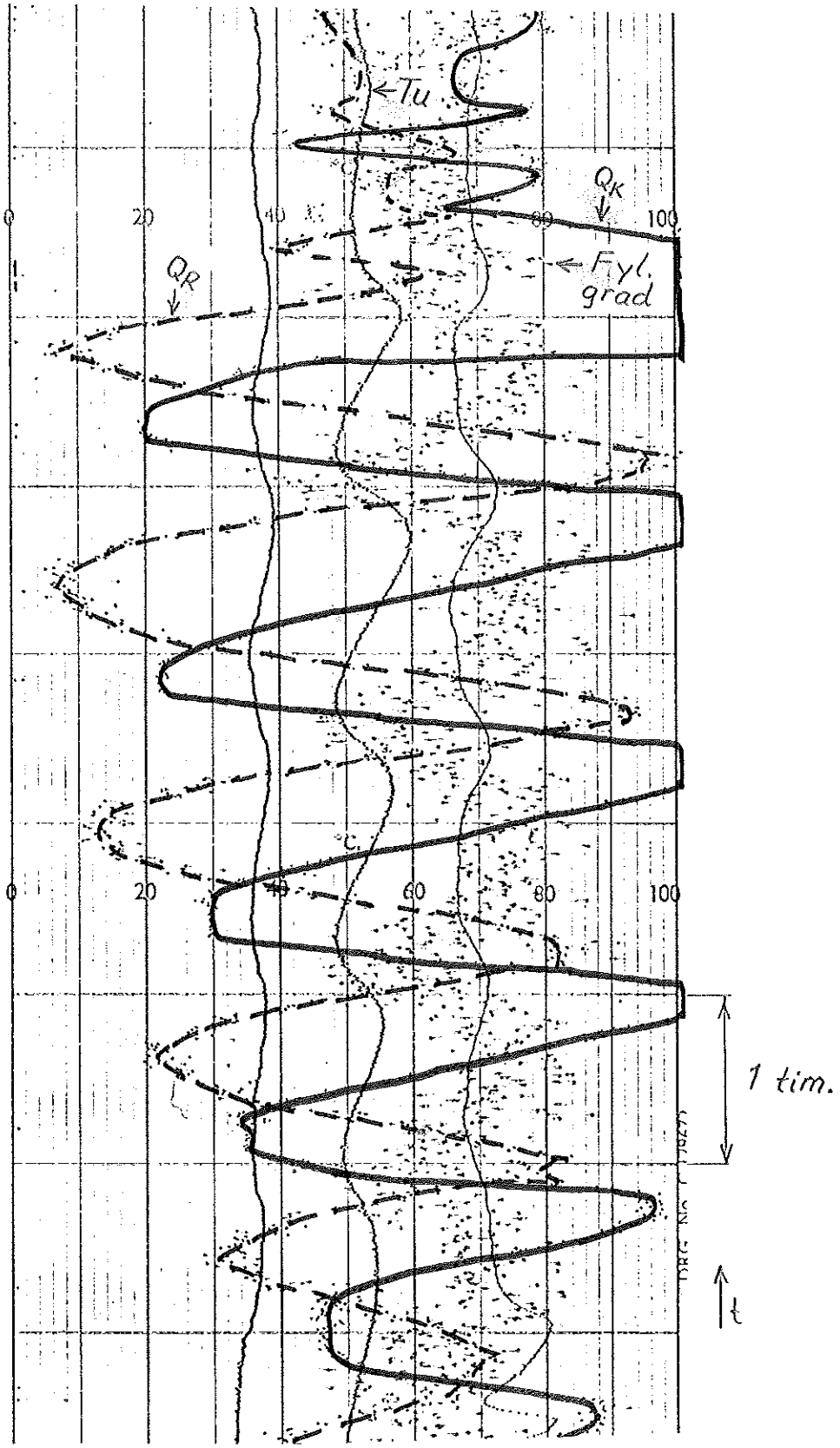


Fig. 7

Detta medför att man skulle kunna tro att det skulle gå lättare att mala vid höga temperaturer, så är emellertid ej fallet enligt personalen vid AB Cementa. Vidare svänger returflödeskurvan i regel med högre frekvens än T_U, så att man kan inte säga att Q_R och T_U svänger i något visst förhållande till varandra mer än just vid temperaturfallen.

Det händer också att Q_R kommer in i en svängning med ständigt växande amplitud (se figur nr 7). Den ursprungliga frekvensen bibehålles emellertid både hos Q_R och T_U. T_U's amplitud ökar något med ökningen hos Q_R. När Q_R's amplitud blivit så stor att den pendlar mellan 0 och 200 ton/$_h$ försvinner denna instabila svängning plötsligt och förloppet återgår snabbt till det "normala".

3. PROBLEMSTÄLLNINGEN

Som framgått av det föregående är problemet att kunna reglera T_U så att den håller sig inom det givna intervallet (100 - 130°C). För att kunna angripa detta problem på ett adekvat sätt krävs emellertid kännedom om kvarnens uppförande och dess beroende av de olika flödena. På grund härav kommer därför tyngdpunkten på detta examensarbete att läggas vid att på något sätt få fram ett matematiskt samband som beskriver kvarnens uppförande.

Det finns väsentligen två sätt att få fram ett matematiskt samband av det ovannämnda slaget. Det ena är att på något sätt helt teoretiskt bygga sig en modell och det andra är att använda sig av någon systemidentifikationsmetod.

När man använder sig av modellbygge utgår man ifrån fysikaliska lagar och samband och sätter upp jämviktsekvationer som ger sambandet mellan storheterna. Ofta bereder det emellertid stora svårigheter att exakt kunna ta reda på vad som sker enligt fysikens lagar och man tvingas till approximationer som ibland blir ganska grova.

Ett annat sätt är då att mäta de olika in- och utsignalerna och att ansätta ett samband med obekanta koefficienter. Med hjälp av ett systemidentifieringsprogram kan man sedan på en datamaskin iterera sig fram till de koefficienter som bäst återger sambandet mellan ut- och insignalerna.

Ofta använder man sig emellertid av båda metoderna eftersom ett modellbygge ger en god uppfattning om hur man skall ansätta sambandet och vilka startvärden man skall välja vid systemidentifikationsmetoden.

4. EN TEORETISK MODELL FÖR KVARNEN

4.1 Jämviktsekvationen

Klinkernas och returflödets specifika värme betecknas med c_K vattnets med c_A och vattnets ångbildningsvärme med $c_{\ddot{A}}$.

Vidare gäller att $Q_K + Q_R = Q_T$ (1)

För att komma vidare måste en förenkling göras, nämligen att $Q_T = Q_U$. Detta är inte riktigt sant, ty genomloppstiden genom kvarnen är 40 min. men i medeltal måste det emellertid stämma, annars skulle cement ansamlas i kvarnen.

Vidare framgår av figur nr 5 att temperaturen inne i kvarnen kan tecknas som en linjär funktion av avståndet från inloppet plus T_U. Kalla denna funktion $L(x)$. x = avståndet från inloppet. Antag vidare att vid temperaturförändringar i kvarnen ändras temperaturen lika mycket överallt i kvarnen. Om temperaturen inne i kvarnen betecknas med $T_x(x,t)$ gäller $T_x(x,t) = L(x) + T_U(t)$ och att

$$\frac{dT_x(x,t)}{dt} = \underbrace{\frac{dL(x)}{dt}}_{=0} + \frac{dT_U(t)}{dt}$$

$$\therefore \frac{dT_U}{dt} = \frac{dT_x}{dt} \qquad (2)$$

Beteckna massan hos malkropparna och kvarnhöljet med m_m och den tillhörande specifika värmen med c_m.

Den sammanlagda massan av klinker och cement inne i kvarnen betecknas med m_s. Denna har specifika värmet c_K.

En jämviktsbetraktelse ger då (se fig. 4)

$$(m_m\ c_m + m_s\ c_K)\ \frac{dT_x}{dt} =$$

$$\underbrace{(Q_K\ c_K\ T_K + Q_R\ c_K\ T_R + Q_A\ c_A\ T_A + P)}_{\text{inflödet}} -$$

$$\underbrace{(Q_T\ c_K\ T_U + Q_A\ c_A\ 373 + Q_A\ c_{\mathring{A}} + E)}_{\text{utflödet}} \qquad (3)$$

Använd (1) och (2) och antag att T_R kan skrivas som T_U-20°
d.v.s. att $T_R = T_U - 20^\circ$ (4)

$$(m_m\ c_m + m_s\ c_K)\ \frac{dT_U}{dt} = c_K\ (Q_K\ T_K + Q_R\ T_U - Q_R\ 20 - Q_T\ T_U) +$$

$$Q_A\ \left[c_A\ (T_A - 373) - c_{\mathring{A}}\right] + P - E \qquad (5)$$

$$(m_m\ c_m + m_s\ c_K)\ \frac{dT_U}{dt} = -\ c_K\ Q_K\ T_U + Q_K\ \left[c_K\ (T_K + 20)\right] +$$

$$Q_A\ \left[c_A\ (T_A - 373) - c_{\mathring{A}}\right] - c_K\ Q_T\ 20 + P - E$$

Sätt $m_m\ c_m + m_s\ c_K = K_1$. Vidare kan T_K periodvis anses konstant.

Sätt därför $c_K\ (T_K + 20) = K_2$ och $c_A\ (T_A - 373) - c_{\mathring{A}} = K_3$.

Kvarnens matningsanordning fungerar dessutom så att Q_T alltid är konstant. Detta sker på så sätt att Q_R mättes och att Q_K regleras därefter. Detta medför att man kan sätta

$$- c_K Q_T 20 + P - E = K_4.$$

$$\therefore K_1 \frac{dT_U}{dt} + c_K Q_K T_U = Q_K K_2 + Q_A K_3 + K_4 \qquad (6)$$

4.2 Konstanternas teoretiska värden

$$K_1 = m_m c_m + m_s c_K$$

m_m = massan av kvarnhöljet och malkropparna.

Massan hos kvarnhöljet har uppskattats med hjälp av monteringsritningar på kvarnen. Vidare är det oklart hur mycket av lagerställ, fundament och dylikt som skall medräknas. Detta gör att denna siffra är ganska osäker.

Massan hos malkropparna har givits av AB Cementa.

m_m uppskattas sålunda till 360 ton.

c_m specifika värmet för vanligt stål är $0{,}46 \cdot 10^3$ J/kg.grad.

m_s = mängden cement och klinker inne i kvarnen.
På Cementa uppskattar man volymen av m_s till c:a 46 m^3 och med en täthet på 1,2 ton/m^3 medför det att c_m sättes till 38,4 ton.

c_K specifika värmet för cement och klinker är $0{,}75 \cdot 10^3$ J/kg.grad

Detta gör att K_1 blir

$360 \cdot 10^3 \cdot 0{,}46 \cdot 10^3 + 38{,}4 \cdot 10^3 \cdot 0{,}75 \cdot 10^3 = 1{,}95 \cdot 10^8$ J/grad

$$\underline{K_1 = 1{,}95 \cdot 10^8 \text{ J/grad}}$$

$K_2 = c_K (T_K + 20)$

c_K som ovan $0{,}75 \cdot 10^3$ J/kg.grad

T_K uppskattas till i genomsnitt 348^oK

$K_2 = 0{,}75 \cdot 10^3 \cdot 368 = 2{,}78 \cdot 10^5$ J/kg

$$\underline{K_2 = 2{,}78 \cdot 10^5 \text{ J/kg}}$$

$K_3 = c_A (T_A - 373) - c_Å$

c_A specifika värmet för vatten är $4{,}18 \cdot 10^3$ J/kg.grad

$c_Å$ vattnets ångbildningsvärme är $2{,}26 \cdot 10^6$ J/kg

T_A antages vara 10^oC d.v.s. 283^oK

$K_3 = 4{,}18 \cdot 10^3 (283 - 373) - 2{,}26 \cdot 10^6 = -2{,}64 \cdot 10^6$ J/kg

$$\underline{K_3 = -2{,}64 \cdot 10^6 \text{ J/kg}}$$

$K_4 = - c_K Q_T 20 + P - E$

$c_K = 0{,}75 \cdot 10^3$ J/kg.grad

Q_T uppskattas till i genomsnitt 200 ton/h

P uppskattas till $0{,}9 \cdot 2{,}43 \cdot 10^6$ W

$$K_4 = - 0{,}75 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 20 \frac{1}{3600} + 0{,}9 \cdot 2{,}43 \cdot 10^6 - E$$

$$\underline{K_4 = 1{,}36 \cdot 10^6 - E \quad W}$$

Detta medför att ekvation (6) får följande utseende

$$1{,}95 \cdot 10^8 \frac{dT_U}{dt} + 0{,}75 \cdot 10^3 Q_K T_U = 2{,}78 \cdot 10^5 Q_K$$

$$- 2{,}64 \cdot 10^6 Q_A + 1{,}36 \cdot 10^6 - E.$$

4.3 Termernas storlek

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} + c_K Q_K T_U = Q_K K_2 + Q_A K_3 + K_4$$

Konstanternas teoretiska värden ger

$$1{,}95 \cdot 10^8 \frac{dT_U}{dt} + 0{,}75 \cdot 10^3 Q_K T_U = 2{,}78 \cdot 10^5 Q_K -$$

$$2{,}64 \cdot 10^6 Q_A + 1{,}36 \cdot 10^6 - E$$

Genomsnittsvärde på Q_K är $\frac{60}{3,6}$ kg/s = 16,7 kg/s
och på Q_A $\frac{2,4}{3,6}$ kg/s = 0,67 kg/s.

T_U rör sig omkring 110°C d.v.s. 383°K.
Detta medför:

$$\frac{dT_U}{dt} + 2,46 \cdot 10^{-2} = 2,38 \cdot 10^{-2} - 0,90 \cdot 10^{-2}$$
$$+ 0,7 \cdot 10^{-2} - 0,51 \cdot 10^{-8} E$$

Då värdet på E är mycket svårt att uppskatta kan man som ekvationen ovan visar inte försumma någon av termerna i de fortsatta räkningarna.

4.4 Jämförelse mellan den teoretiska modellen och uppmätta beteende

Den teoretiska modellen lyder

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} + c_K Q_K T_U = Q_K K_2 + Q_A K_3 + K_4$$

Då Q_A ej finns kontinuerligt registrerat kan man ej göra någon jämförelse i detta avseende.

Q_K finns däremot registrerat och för att kontrollera om en höjning av Q_K enligt modellen höjer eller sänker T_U ansättes att T_U= 110°C = 383°K.
Detta medför:

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} = Q_K (K_2 - c_K 383) + Q_A K_3 + K_4$$

Siffervärden ger $K_2 - c_K \cdot 383 = 2{,}78 \cdot 10^5 - 0{,}75 \cdot 10^3 \cdot 383 = - 5{,}65 \cdot 10^5$

Alltså bör en höjning av Q_K enligt modellen medföra en sänkning av T_U.

Om man tittar på exempelvis figur nr 6, finner man att vid varje temperaturmaximum har man även ett maximum på Q_K. Betänker man att genomloppstiden i kvarnen är c:a 40 min. och att T_U svänger med en periodtid på c:a 1,5 tim borde modellen stämma med verkligheten, ty den till ett visst Q_K hörande T_U registreras först 40 min. efter det att klinkerna matats in i kvarnen. Emellertid är detta resonemang ganska osäkert, ty man vet ej hur vattenflödet uppför sig och detta har med säkerhet stor betydelse för T_U.

5. EXPERIMENT OCH IDENTIFIERING

5.1 Krav och begränsningar på experimenten

För att med hjälp av befintliga program kunna göra en systemidentifikation krävdes att ekvationen som skulle identifieras var linjär. Den teoretiskt framtagna modellen

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} + c_K Q_K T_U = Q_K K_2 + Q_A K_3 + K_4 \qquad (6)$$

är emellertid olinjär i termen $c_K Q_K T_U$. Denna svårighet kan emellertid klaras av om man vid försöken låter Q_K vara konstant. Detta medför dock att Q_T inte blir konstant längre och att ekvation (6) inte gäller, ty K_4 innehåller ju Q_T. Med utgångspunkt från ekvation (5) kan man i stället skriva

$$(m_m c_m + m_s c_K) \frac{dT_U}{dt} = - c_K Q_K T_U + c_K Q_K T_K - c_K Q_R 20$$

$$+ Q_A \left[c_A (T_A - 373) - c_A^{\circ}\right] + P - E.$$

D.v.s.

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} = - c_K Q_K T_U + K_5 Q_K - K_6 Q_R + K_3 Q_A + K_7 \qquad (7)$$

Med samma antagande och förutsättningar som i 4.2 blir konstanternas teoretiska värden

$K_1 = 1{,}95 \cdot 10^8$ J/grad

$K_3 = -2{,}64 \cdot 10^6$ J/kg

$K_5 = c_K T_K = 0{,}75 \cdot 10^3 \cdot 348 = 2{,}61 \cdot 10^5$ J/kg

$K_6 = c_K 20 = 0{,}75 \cdot 10^3 \cdot 20 = 1{,}5 \cdot 10^4$ J/kg

$K_7 = 0{,}9 \cdot 2{,}43 \cdot 10^6 - E = 2{,}19 \cdot 10^6 - E$ W

Vidare finns det inte någon kontinuerlig registrering av vattenflödet utan då man kontrollerar detta endast genom en vanlig ackumulerande mängdmätare måste Q_A hållas konstant. Man kan dock ändra Q_A stegvis men får då se till att det hålles konstant så länge mellan stegen att ett tillförlitligt värde på Q_A kan framräknas.

För att inte störa produktionen för mycket gällde vidare följande begränsningar:

T_U skulle ligga i intervallet 100 - 130°C,

Q_K i intervallet 40 - 80 ton/h och

Q_T i intervallet 120 - 200 ton/h.

5.2 Experimentens utförande.

För att uppfylla kraven i 5.1 utfördes försöken på följande sätt.

All automatisk styrning och reglering slogs ifrån. Därefter inställdes Q_K på ett konstant värde som bibehölls under hela experimentet. Q_A inställdes också på ett konstant värde, som dock ändrades som ett steg vid ett tillfälle. På grund av diverse produktionstekniska svårigheter med kvarnen gavs endast tillfälle till två försök och resultaten av dessa framgår av figur nr 8 (försök 1) och figur nr 9 (försök 2). Försök 1, som användes vid systemidentifikationen, plottades och värdena omräknades sedan till MKSA-enheter. Resultatet av detta framgår av tabell 1.

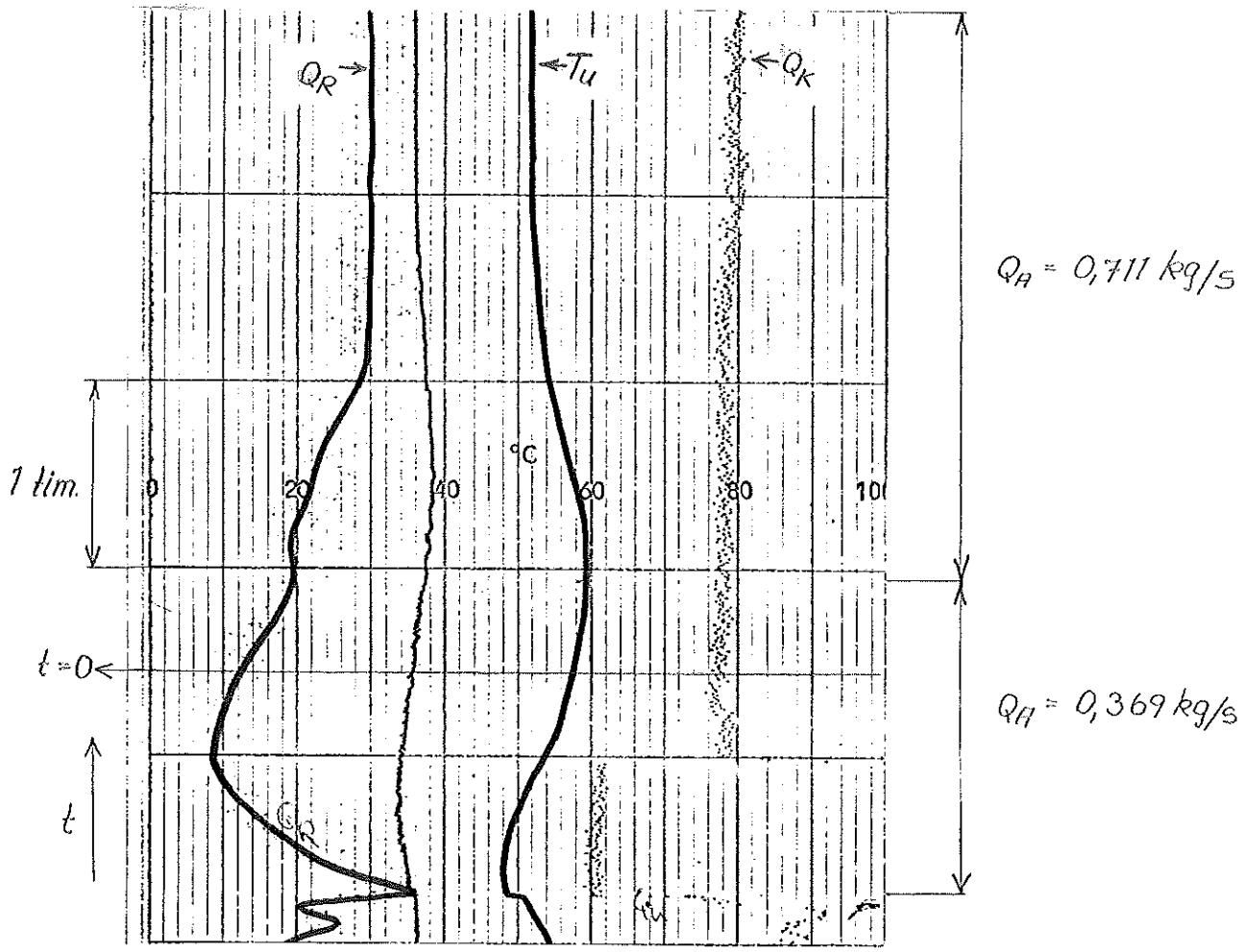


Fig. 8. Försök 1.

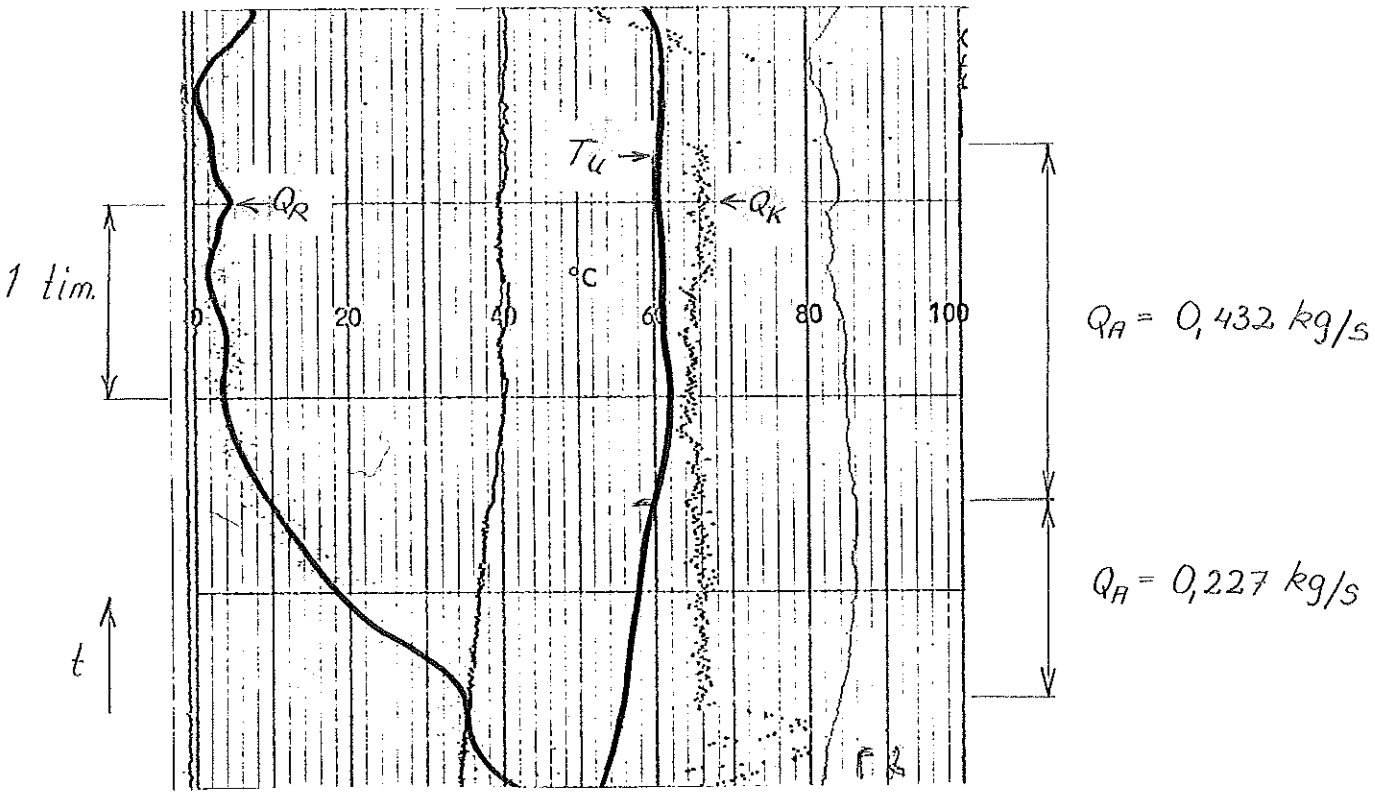


Fig. 9. Försök 2.

TABELL 1 Försök 1

NR	t. s	T_U °K	Q_K kg/s	Q_R kg/s	Q_A kg/s
0	0	389,1	21,40	6,38	0,369
1	142	389,2		6,70	
2	284	389,6		7,17	
3	426	390,2		7,28	
4	568	391,1		7,64	
5	710	391,2		7,85	
6	852	391,3		8,34	
7	994	391,4		8,70	
8	1136	391,4		8,79	
9	1278	391,5		9,17	
10	1420	391,7		9,58	
11	1562	391,5		9,78	
12	1704	391,6		10,00	0,369
13	1846	391,7		10,20	0,711
14	1988	391,8		10,35	
15	2130	391,9		10,57	
16	2272	391,8		10,59	
17	2414	391,7		10,61	
18	2556	391,6		10,83	
19	2698	391,4		10,86	
20	2840	391,2		11,03	
21	2982	391,1		11,09	
22	3124	390,2		11,40	
23	3266	389,7		11,69	
24	3408	389,2		12,02	
25	3550	389,1		12,22	
26	3692	387,6		12,60	
27	3834	387,3	21,40	12,83	0,711

NR	s t.	^{o}K T_U	kg/s Q_K	kg/s Q_R	kg/s Q_A
28	3976	387,2	21,40	13,08	0,711
29	4118	386,7		13,35	
30	4260	386,2		13,39	
31	4402	385,6		13,90	
32	4544	385,2		14,18	
33	4686	385,0		14,42	
34	4828	384,1		14,68	
35	4970	383,4		15,09	
36	5112	383,2		15,29	
37	5254	382,9		15,54	
38	5396	382,4		15,81	
39	5538	382,3		16,10	
40	5680	381,7		16,30	
41	5822	381,2		16,37	
42	5964	381,1		16,40	
43	6106	381,0		16,50	
44	6248	380,3		16,61	
45	6390	379,9		16,66	
46	6532	379,3		16,73	
47	6674	379,2		16,75	
48	6816	379,1		16,80	
49	6958	378,9		16,80	
50	7100	378,3		16,80	
51	7242	378,2		16,80	
52	7384	378,2		16,78	
53	7526	378,2		16,75	
54	7668	378,2		16,75	
55	7810	378,0		16,75	
56	7952	377,9		16,73	
57	8094	377,9		16,73	
58	8236	377,7		16,70	
59	8378	377,6		16,70	
60	8520	377,6	21,40	16,66	0,711

NR	s t.	°K T_U	kg/s Q_K	kg/s Q_R	kg/s Q_A
61	8662	377,5	21,40	16,66	0,711
62	8804	377,4			
63	8946	377,3			
64	9088	377,3			
65	9230	377,2			
66	9372				
67	9514				
68	9656				
69	9798				
70	9940				
71	10082				
72	10224				
73	10366	377,2			
74	10508	377,1			
75	10650	377,1			
76	10792	377,0			
77	10934	377,0			
78	11076	376,9			
79	11218	376,9			
80	11360	377,0			
81	11502	377,2			
82	11644				
83	11786				
84	11928				
85	12070				
86	12212				
87	12354				
88	12496				
89	12638				
90	12780	377,2	21,40	16,66	0,711

5.3 Identifieringen

För identifieringen användes UNIVAC 1108 och ett system-identifikationsprogram som arbetar efter minsta kvadrat-metoden.

Programmet fungerar på så sätt, att det med de teoretiska värdena på konstanterna som startvärde i den teoretiska modellen, simulerar systemet på grundval av de aktuella insignalerna under ett försök (Q_R Q_K Q_A). Den härvid uppkomna utsignalen jämföres sedan med den verkliga (T_U). Om modellens utsignal kallas Y_m, definieras en förlust-funktion enligt

$$F = \sum_i (Y_{mi} - T_{Ui})^2$$

där i är index för avläsningstidpunkten. Systemet varierar sedan på konstanterna så att F blir minimum. De värden på konstanterna som ger F minimum anses sedan vara de rätta.

De teoretiska startvärdena fås ur ekvation (7) som lyder

$$K_1 \frac{dT_U}{dt} = - c_K Q_K T_U + K_5 Q_K - K_6 Q_R + K_3 Q_A + K_7$$

Om konstanternas värden (se 5.1) insättes får man

$$1{,}95 \cdot 10^8 \frac{dT_U}{dt} = - 0{,}75 \cdot 10^3 Q_K T_U + 2{,}61 \cdot 10^5 Q_K$$

$$- 1{,}5 \cdot 10^4 Q_R - 2{,}64 \cdot 10^6 Q_A + 2{,}19 \cdot 10^6 - E$$

$$\frac{dT_U}{dt} = -3{,}84 \cdot 10^{-6}\, Q_K\, T_U + 1{,}34 \cdot 10^{-3}\, Q_K - 7{,}70 \cdot 10^{-5}\, Q_R$$

$$- 1{,}35 \cdot 10^{-2}\, Q_A + \frac{2{,}19 \cdot 10^{6} - E}{1{,}95 \cdot 10^{8}}$$

Värdena från försök 1 användes nu och där är $Q_K = 21{,}4$ kg/s. Då E är okänt och svårt att uppskatta sättes detta till 0. Ekvationen får då följande utseende.

$$\frac{dT_U}{dt} = -8{,}2 \cdot 10^{-5}\, T_U + 2{,}87 \cdot 10^{-2} - 1{,}35 \cdot 10^{-2}\, Q_A$$

$$- 7{,}70 \cdot 10^{-5}\, Q_R + 1{,}12 \cdot 10^{-2}$$

D.v.s.

$$\frac{dT_U}{dt} = -8{,}2 \cdot 10^{-5}\, T_U - 1{,}35 \cdot 10^{-2}\, Q_A - 7{,}70 \cdot 10^{-5}\, Q_R$$

$$+ 3{,}99 \cdot 10^{-2}$$

Med dessa värden på konstanterna och med $T_U(0) = 389{,}1^{\circ}K$ får förlustfunktionen F värdet $1{,}1 \cdot 10^{5}$

Efter många iterationsomstartningar och även med minimering med avseende på $T_U(0)$ fås F att minska till 20. Konstanterna i modellen har då ändrats och ekvationen har fått följande utseende.

$$\frac{dT_U}{dt} = -8{,}27 \cdot 10^{-4}\, T_U - 2{,}37 \cdot 10^{-3}\, Q_A - 1{,}56 \cdot 10^{-3}\, Q_R$$

$$+ 0{,}340 \qquad (8)$$

och $T_U(0)$ har värdet $387{,}6^{\circ}K$.

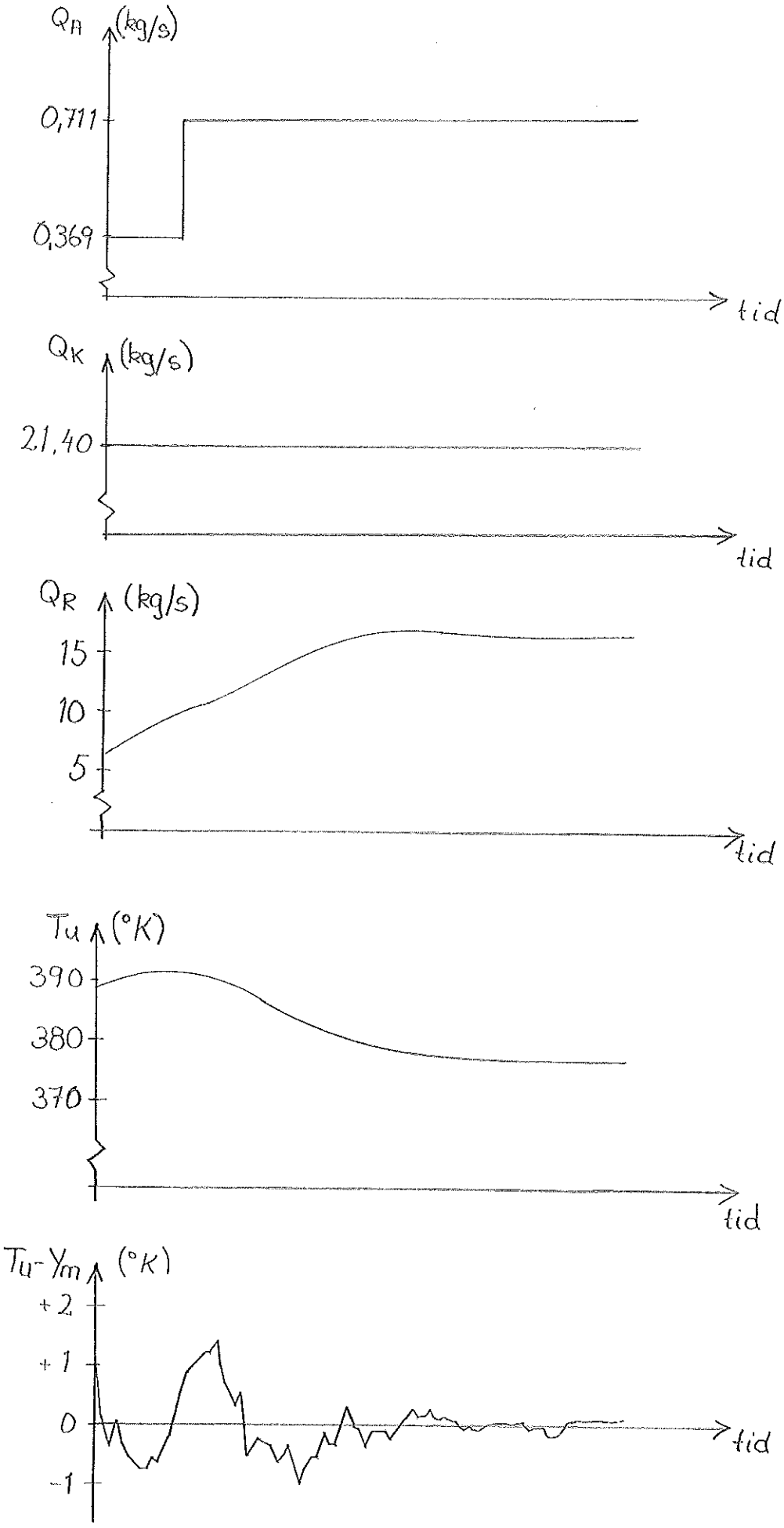


Fig. 10. Systemidentifiering på försök 1.

Skillnaden mellan modellens utsignal och den verkliga kan nu avläsas ur figur nr 10. Här bör dock erinras om att noggrannheten på den verkliga temperaturen ej är särskilt hög då den har avlästs från ett diagram där 1 cm motsvarar $20^{o}K$.

Om värdet av Q_K sättes in i ekvation (8) fås

$$\frac{dT_U}{dt} = - 0{,}386 \cdot 10^{-4}\ Q_K\ T_U - 2{,}37 \cdot 10^{-3}\ Q_A$$

$$- 1{,}56 \cdot 10^{-3}\ Q_R + K_5\ Q_K + K_7 \qquad (9)$$

$$\text{Där } K_5\ Q_K + K_7 = 0{,}340 \qquad (10)$$

Ekvation nr (9) ger ej alla de sökta konstanterna, utan endast summan av $K_5 \cdot Q_K$ och K_7. För att klara av detta är det nödvändigt att använda sig även av försök 2. Detta är inte riktigt bra ty de båda försöken är inte gjorda samma dag, så man kan inte veta om de yttre förhållandena varit likvärdiga.

Om man betraktar T_U i försök 2 finner man att den i slutet av försöket är i det närmaste konstant.
Detta medför att $\frac{dT_U}{dt} = 0$.

Om värdena på Q_A, Q_R, Q_K och T_U avläses vid denna tidpunkt fås

$Q_A = 0{,}432\ kg/_s$ $\qquad$ $Q_K = 18{,}33\ kg/_s$

$Q_R = 1{,}67\ kg/_s$ $\qquad$ $T_U = 394^{o}K$

Ekvation (9) ger då

$$0 = -0{,}386 \cdot 10^{-4} \cdot 18{,}33 \cdot 394 - 2{,}37 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}432$$
$$- 1{,}56 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}67 + K_5 \cdot 18{,}33 + K_7$$

$$K_5 \; 18{,}33 + K_7 = 0{,}2826 \qquad (11)$$

Från försök 1 gäller ekvation (10)

$$K_5 \, Q_K + K_7 = 0{,}340$$

(10) och (11) ger då värdet av K_5 och K_7.

$$K_5 = 1{,}86 \cdot 10^{-2}$$
$$K_7 = -5{,}83 \cdot 10^{-2}$$

Den fullständiga matematiska modellen för kvarnen skulle alltså enligt identifieringsmetoden se ut så här.

$$\frac{dT_U}{dt} = -0{,}386 \cdot 10^{-4} \, Q_K \, T_U + 1{,}86 \cdot 10^{-2} \, Q_K$$
$$- 2{,}37 \cdot 10^{-3} \, Q_A - 1{,}56 \cdot 10^{-3} \, Q_R - 5{,}83 \cdot 10^{-2} \qquad (12)$$

5.4 Jämförelse mellan den teoretiska och den genom identifiering framtagna modellen.

Den teoretiska modellen har följande utseende (ekv. 7)

$$\frac{dT_U}{dt} = -3{,}84 \cdot 10^{-6} \, Q_K \, T_U + 1{,}34 \cdot 10^{-3} \, Q_K - 7{,}70 \cdot 10^{-5} \, Q_R$$
$$- 1{,}35 \cdot 10^{-2} \, Q_A + \frac{2{,}19 \cdot 10^{6} - E}{1{,}95 \cdot 10^{8}}$$

och den genom identifiering framtagna har följande (ekv. 12)

$$\frac{dT_U}{dt} = - 3{,}86\ 10^{-5}\ Q_K\ T_U + 1{,}86\ 10^{-2}\ Q_K - 2{,}37\ 10^{-3}\ Q_A$$

$$- 1{,}56\ 10^{-3}\ Q_R - 5{,}83\ 10^{-2}.$$

Som synes är det avsevärda skillnader på konstanterna framför $Q_K \cdot T_U$, Q_K, Q_R och Q_A. Detta har dock troligen sin förklaring i det ganska oprecisa sätt som de teoretiska konstanterna är framtagna på. Märkligare är då att den sista konstanta termen har bytt tecken, ty $\frac{2{,}19 \cdot 10^6 - E}{1{,}95 \cdot 10^8}$ kan ju aldrig bli negativ beroende på att $2{,}19 \cdot 10^6$ motsvarar hela motoreffekten och E endast den genom värmeledning och strålning till omgivningen förlorade effekten.

En förklaring till detta kan vara det som nämnts tidigare, nämligen att försök 1 och 2 ej är gjorda vid ungefär samma tidpunkt. Detta borde emellertid ej kunna betyda så mycket att termer kan byta tecken utan endast att de i ekvationen ingående konstanterna ändrar sig till storlek.

För att närmare kontrollera modellens riktighet kommer därför simuleringar på en analogimaskin att göras.

6. SIMULERING PÅ ANALOGIMASKIN

För att testa modellens tillförlitlighet simuleras försök 1 på analogimaskinen och T_U registreras. Därefter gör man om samma sak endast med den skillnaden att man börjar tidigare, nämligen vid punkt A i figur nr 11. Om modellen nu är rätt så skall T_U vara densamma i båda registreringarna för de tidpunkter som är gemensamma.

Vid första simuleringen är Q_K konstant nämligen 21,4 kg/s. Ekvation (8) ger då

$$\frac{dT_U}{dt} = -8{,}27\cdot10^{-4}\,T_U + 3{,}40\cdot10^{-1} - 2{,}37\cdot10^{-3}\,Q_A$$

$$- 1{,}56\cdot10^{-3}\,Q_R$$

Då spänningarna i analogimaskinen skall ligga mellan $\pm$ 100 volt måste man amplitudskala. Detta ger följande resultat.

Variabel	Max.värde	Skalfaktor	Maskinvariabel
T_U	435 (°K)	0,2	(0,2 T_U)
Q_R	55 (kg/s)	2	(2 Q_R)
Q_A	1 (kg/s)	100	(100 Q_A)
Q_K	21,4 (kg/s)	4	(4 Q_K)

Vidare tidsskalar man för att snabba på förloppen. Tidsskalningsfaktorn sättes till β.

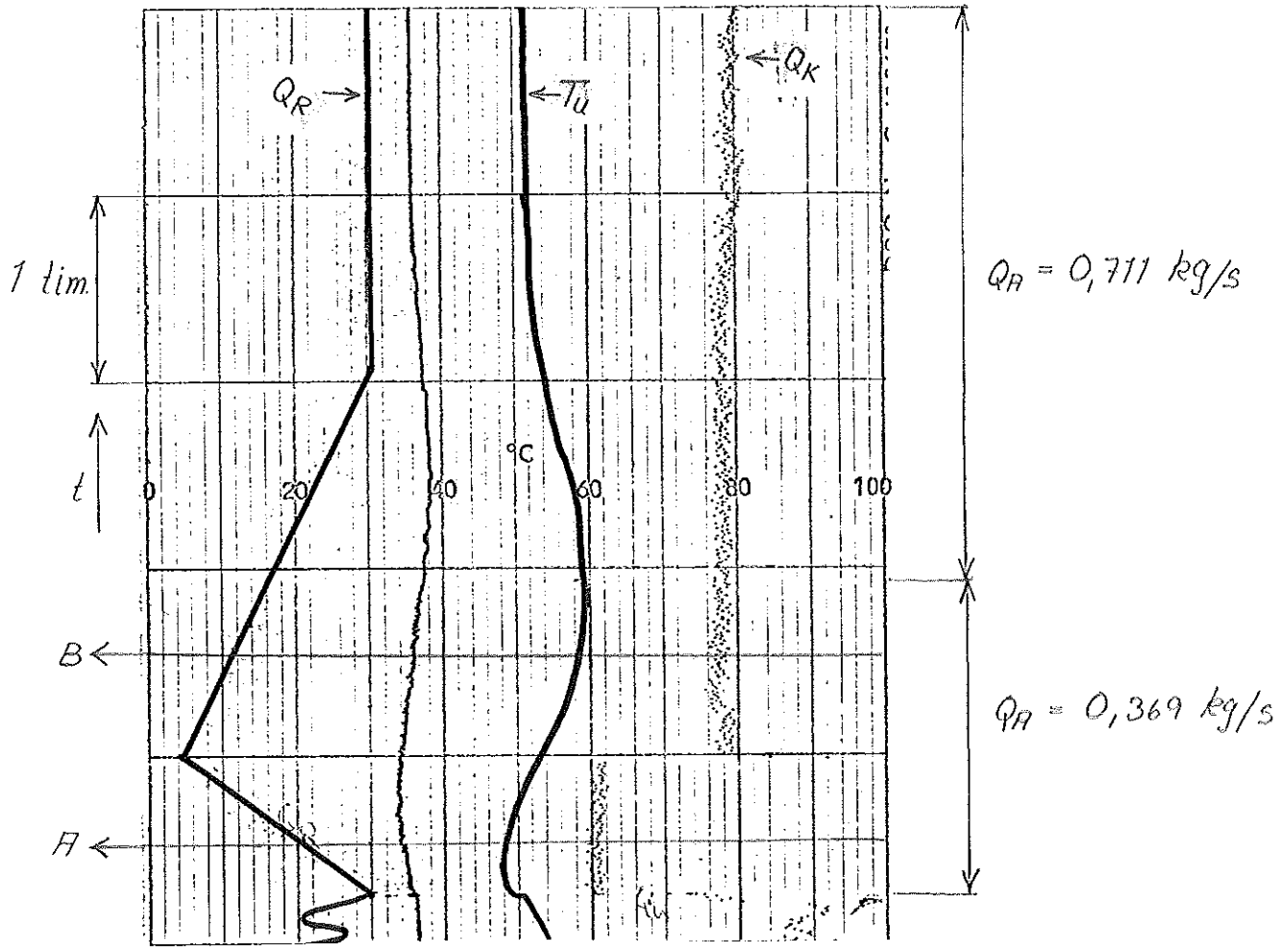


Fig. 11.

Ekvationen får då följande utseende.

$$\frac{d(0,2T_U)}{d\beta t} = \frac{0,2}{\beta}\left[-8,27\cdot 10^{-4}\,\frac{(0,2T_U)}{0,2} + 3,40\cdot 10^{-1}\right.$$

$$\left. - 2,37\cdot 10^{-3}\,\frac{(100Q_A)}{100} - 1,56\cdot 10^{-3}\,\frac{(2Q_R)}{Q_R}\right]$$

$$\frac{d(0,2T_U)}{d\beta t} = \frac{0,2}{\beta}\left[-4,18\cdot 10^{-3}\,(0,2T_U) + 3,40\cdot 10^{-1} - 2,37\cdot 10^{-5}\cdot(100Q_A)\right.$$

$$\left. - 7,8\cdot 10^{-4}\cdot(2Q_R)\right]$$

För att få en vettig maskintid väljes $\beta = 10^{-3}$.

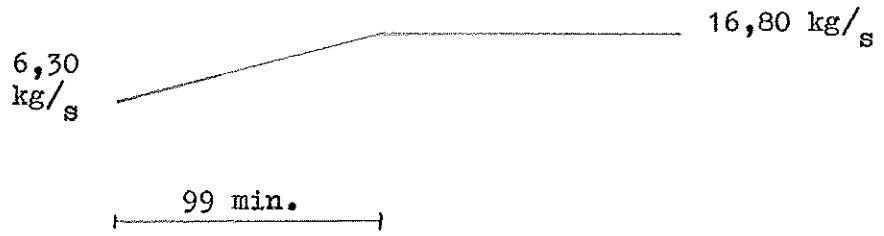
Detta innebär att 1 sekund motsvarar 10^3 sekunder i verkligheten.

Detta ger då:

$$\frac{d(0,2T_U)}{d(10^{-3}t)} = -8,27\cdot 10^{-1}\cdot(0,2T_U) + 6,80\cdot 10^{1} - 4,74\cdot 10^{-3}\cdot(100Q_A)$$

$$- 1,56\cdot 10^{-1}\cdot(2Q_R)$$

För att förenkla uppkopplingen anses Q_R variera enligt figuren nedan. Se även figur nr 11.



99 min. verkl. = $10^{-3} \cdot 99 \cdot 60$ = 5,95 sek. maskintid.

Q_A varierar som i verkligheten d.v.s. som i figuren nedan.

28,2 min. verkl. = $28{,}2 \cdot 60 \cdot 10^{-3}$ = 1,69 sek. maskintid.

Kopplingsschema (NR 1) och potentiometerlista (NR 1) framgår av appendix. Registreringen av T_U, Q_A och Q_R framgår av figur nr 12.

Vid den andra simuleringen som börjar i punkt A i figur 11 är inte Q_K konstant hela tiden. Detta gör att man måste utgå från ekvation 12. Denna lyder

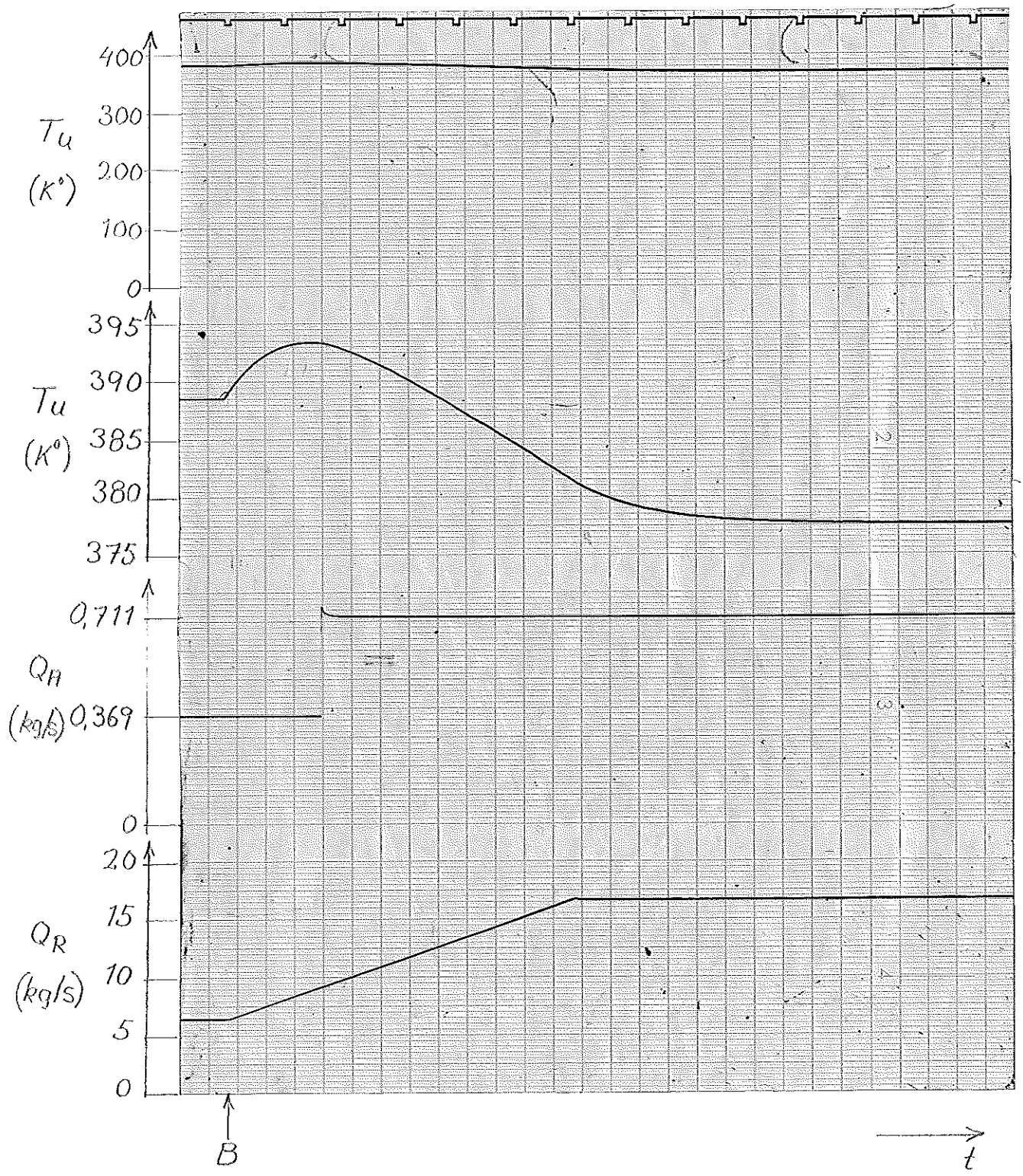


Fig.12. Simulering nr 1.

$$\frac{dT_U}{dt} = -\,0{,}386\cdot10^{-4}\cdot Q_K\,T_U + 1{,}86\cdot10^{-2}\cdot Q_K$$

$$-\,2{,}37\cdot10^{-3}\cdot Q_A - 1{,}56\cdot10^{-3}\cdot Q_R - 5{,}83\cdot10^{-2}$$

Liksom i förra fallet måste ekvationen skalas och för att lättare kunna jämföra de båda simuleringarna väljes samma skalfaktorer. Ekvationen får då följande utseende.

$$\frac{d(0{,}2T_U)}{d(10^{-3}t)} = \frac{0{,}2}{10^{-3}}\left[-\,0{,}386\cdot10^{-4}\frac{(4Q_K)}{4}\cdot\frac{(0{,}2T_U)}{0{,}2} + 1{,}86\cdot10^{-2}\,\frac{(4Q_K)}{4}\right.$$

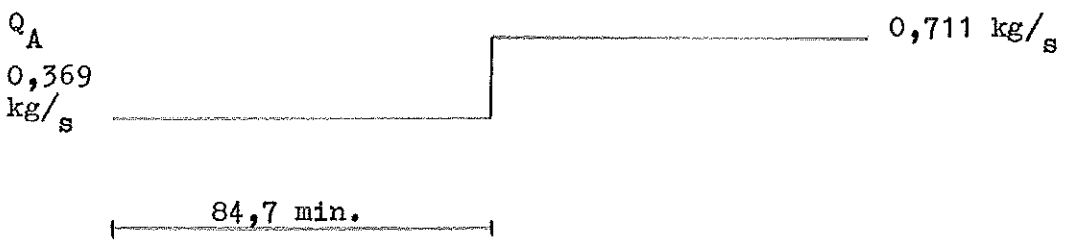
$$\left.-\,2{,}37\cdot10^{-3}\,\frac{(100Q_A)}{100} - 1{,}56\cdot10^{-3}\,\frac{(2Q_R)}{2} - 5{,}83\cdot10^{-2}\right]$$

$$\frac{d(0{,}2T_U)}{d(10^{-3}t)} = -\,9{,}65\cdot10^{-3}\cdot(4Q_K)\cdot(0{,}2T_U) + 0{,}93\cdot(4Q_K)$$

$$-\,4{,}74\cdot10^{-3}\cdot(100Q_A) - 1{,}56\cdot10^{-1}\cdot(2Q_R) - 11{,}66$$

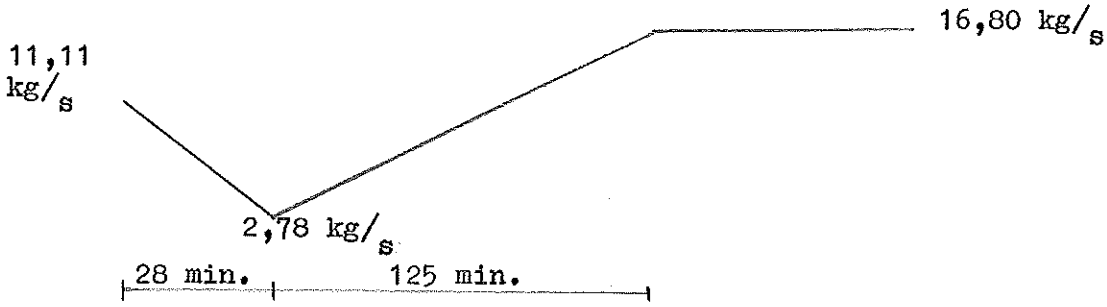
De olika flödena varierade på följande sätt.

28 min. verkl. = $28\cdot60\cdot10^{-3}$ = 1,68 sek. maskintid.



84,7 min. verkl. = $84{,}7\cdot60\cdot10^{-3}$ = 5,08 sek. maskintid.

För att förenkla uppkopplingen antages Q_R variera enligt figuren nedan. Se även figur nr 11.



28 min. verkl. = 1,68 sek. maskintid.
125 min. verkl. = $60 \cdot 125 \cdot 10^{-3}$ = 7,5 sek. maskintid.

Kopplingsschema (NR 2) och potentiometerlista (NR 2) framgår av appendix. Registreringen framgår av figur nr 13.

Som framgår av registreringarna blir skillnaden mellan T_U i simulering 1 och simulering 2 ganska stora. Detta visar alltså att modellen inte är helt perfekt.

Största delen av skillnaderna torde dock härröra från den förenklade bilden av Q_R. Redan simulering 1 uppvisar ju skillnader jämfört med tabell 1. T.ex. skiljer sig slutvärdena på T_U med c:a 0,5°K och max.värdena med c:a 1,5°K. Jämför man vidare T_U i punkten B vid de båda simuleringarna finner man att vid simulering 2 ligger T_U 5,5°K över T_U i simulering 1. Man skulle då kunna tro att simulering 2 efter punkt B borde ligga c:a 5,5°K över simulering 1. Så är emellertid ej fallet ty max.värdena skiljer sig bara med 1°K.

De osäkraste koeffecienterna i modellen är ju enligt 5.3 den konstanta termen och koeffecienten framför Q_K och för att kontrollera om en förändring av dessa kan påverka simulering 2 på ett positivt sätt göres simuleringen om med varierande värden på dessa.

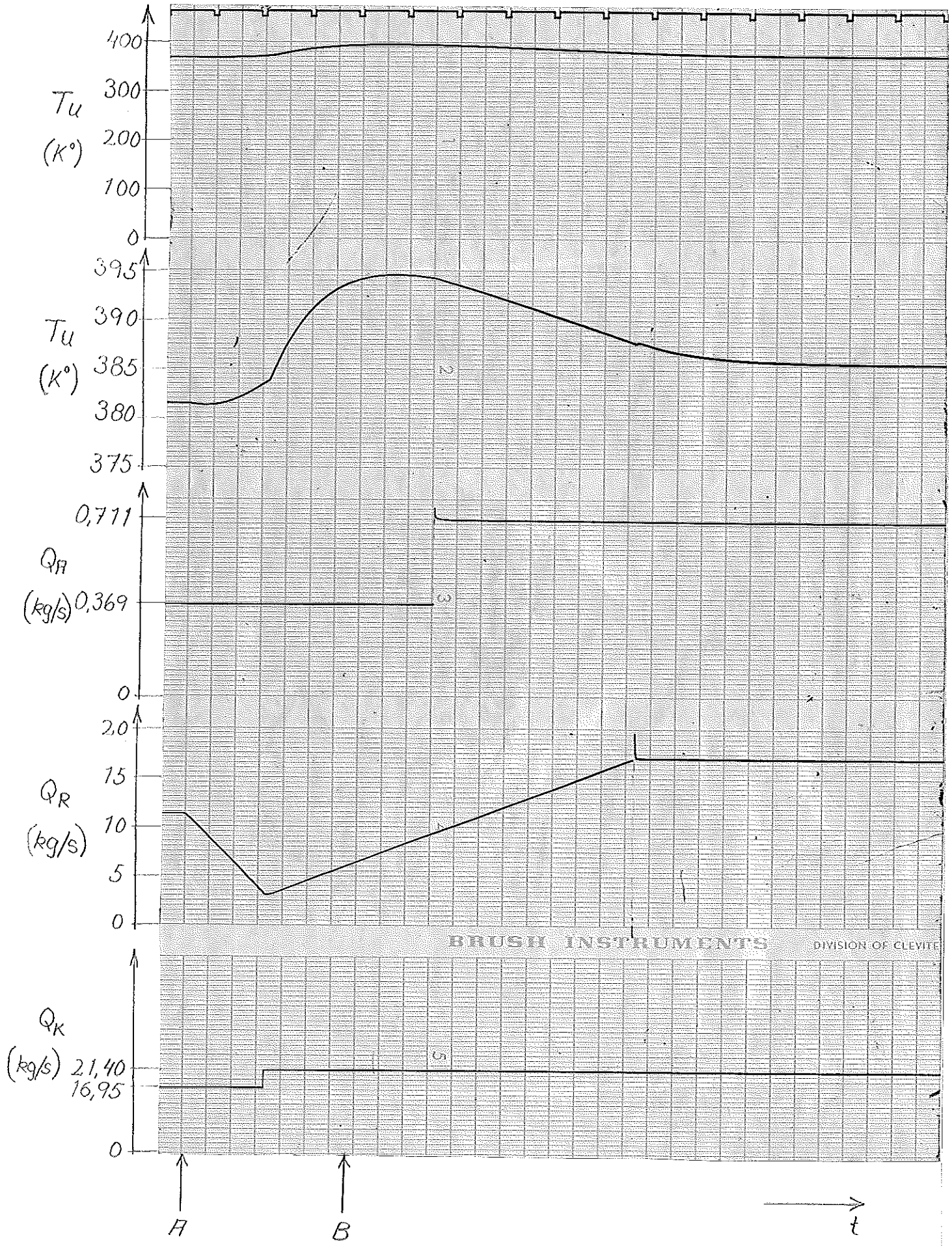


Fig. 13. Simulering nr 2.

Resultatet av detta blir att man ej nämnvärt kan påverka T_U's dynamiska uppförande utan endast flytta temperaturkurvan med bibehållen form upp och ner i temperaturdiagrammet.

I figur nr 14 visas ett exempel där den konstanta termen 11,66 har ändrats till 12,10. Denna ändring gör att max.-temperaturen blir samma som i simulering 1. En ändring på c:a 4 % av den konstanta termen ändrar alltså temperaturen med i genomsnitt med 1°K. Denna stora känslighet för variationer av koeffecienterna gör att det troligtvis inte lönar sig att försöka bestämma dessa med större noggrannhet, ty de yttre betingelserna t.ex. omgivningens temperatur betyder med säkerhet mera. Vidare är ju avsikten att använda modellen för reglering och dessa små variationer på koeffecienterna saknar i detta fall troligtvis betydelse för regulatorns principiella uppbyggnad och inställning.

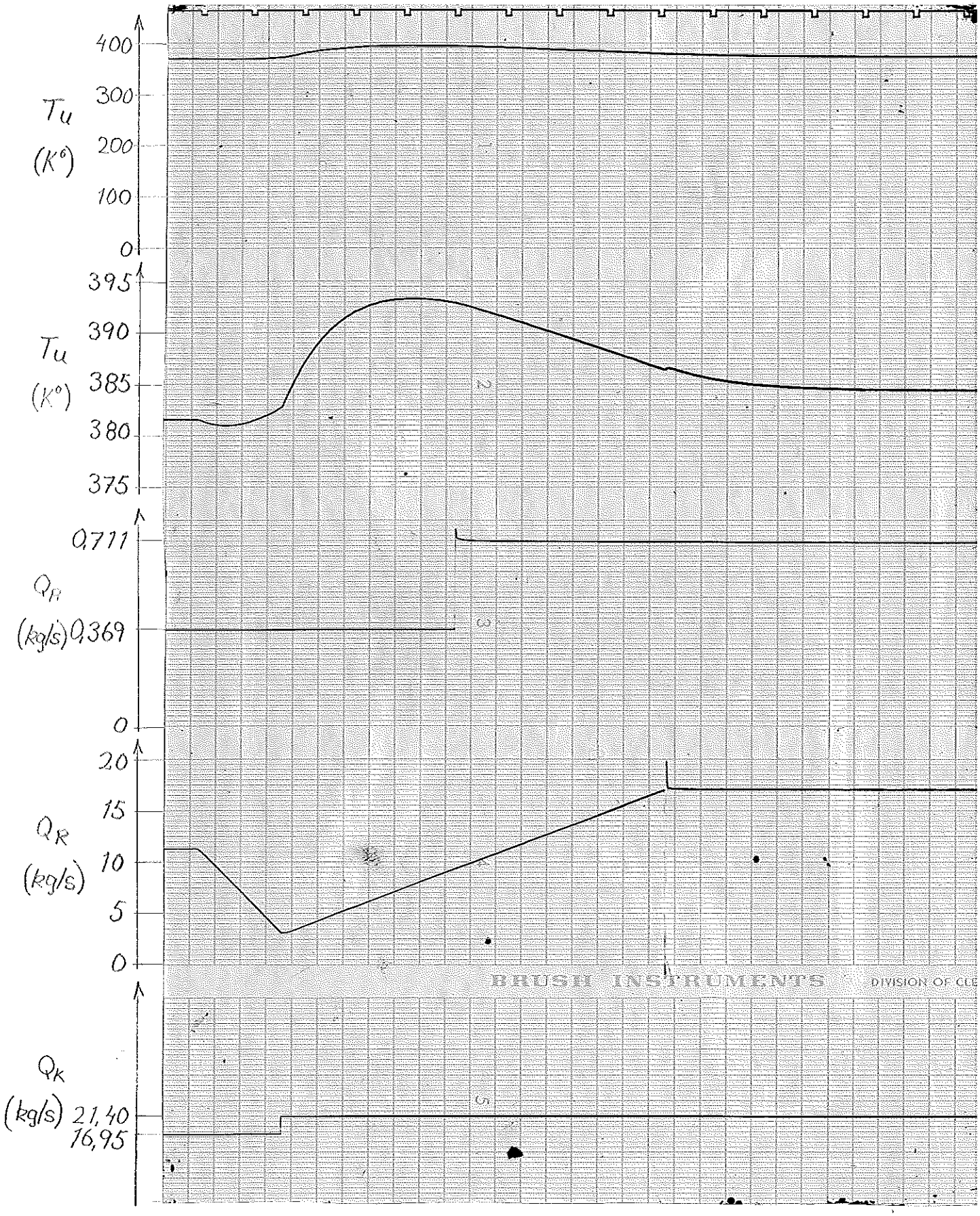


Fig. 14. Simulering nr 3. Den konstanta termen = 12,10.

7. SLUTSATSER

Som det framgår av tidigare avsnitt ger den framtagna modellen ej alltid fullständig överensstämmelse med verkligheten. Detta beror på många orsaker och den främsta är troligtvis att de yttre förhållandena ändras. I dessa innefattas bl.a. sådana saker som omgivningens temperatur, fyllnadsgraden, temperaturen på det insprutade vattnet och klinkerflödets temperatur. Alla dessa variabler ingår i modellen med sina medelvärden och är alltså betraktade som konstanter.

Trots de ovan nämnda bristerna ger modellen en god bild av vad som påverkar T_U och den största rollen spelar utan tvekan Q_R och Q_K. De termer som dessa ingår i är i regel till beloppet cirka 10 - 100 ggr. större än termen med Q_A. Detta gör att man kan hysa vissa betänkligheter mot det sätt på vilket den nuvarande temperaturregleringen är anordnad. Man mäter ju bara temperaturen på två ställen i kvarnen och bryr sig inte alls om värdena på Q_R och Q_K. Q_R och därmed också Q_K ($Q_R + Q_K$ = konst.) varierar emellertid kraftigt (se t.ex. figur nr 6) och de tidigare omtalade svängningarna i T_U beror troligen mycket mer av detta än av inställningen av regulatorerna. Vidare kan man ifrågasätta om det är riktigt att som man gör låta de båda vatteninsprutningsmunstyckena styras av mätsignaler som har en tidsfördröjning i ena fallet på c:a 11 min. och i andra på c:a 29 min. Med detta menas som följer.

Antag att T_U börjar stiga över sitt börvärde t.ex. på grund av en ökning av Q_R. Regulatorn ger då signal till ökad vatteninsprutning vid mellanväggen. Detta vatten kyler nu ner cementen närmast mellanväggen och en bit bort mot utloppet, men cementen i den bortre delen närmast utloppet påverkas ej och därför fortsätter T_U att stiga.

Regulatorn ökar vatteninsprutningen ytterligare och förloppet fortsätter på samma sätt ända tills den cement som först blev nedkyld av vattnet kommer fram till den punkt där T_U mätes. Regulatorn minskar då vattenflödet men under den tid som nu har förflutit kan det mycket väl tänkas att en del av cementen har blivit så mycket nedkyld att den understiger börvärdet när den kommer till utloppet. På detta sätt kan lätt en svängning i temperaturen uppstå.

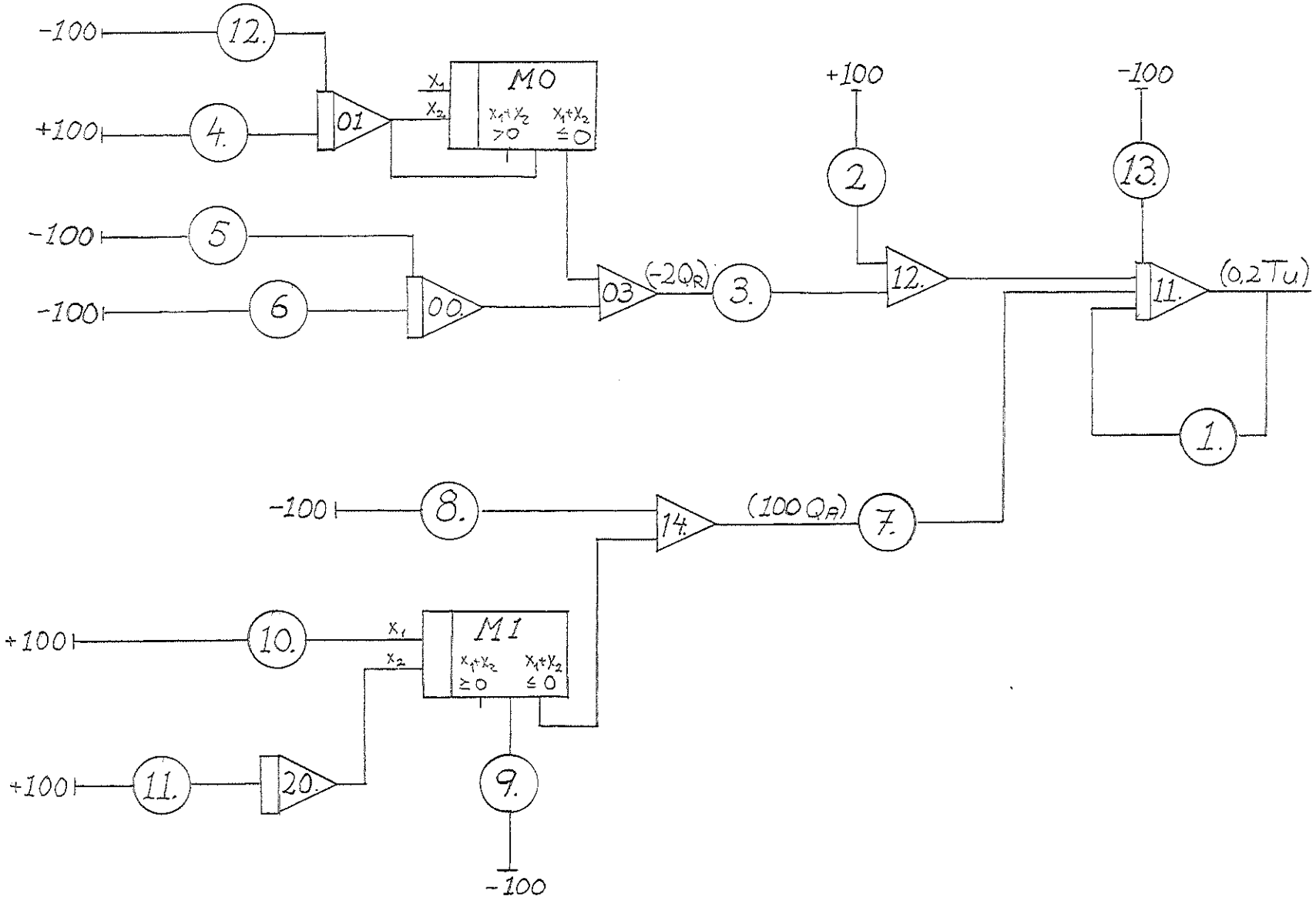
För att lättast undvika dessa svängningar som troligen initieras av variationer i Q_R bör man alltså mäta och kyla på samma ställe, vidare borde man kanske låta en regulator styras av ekvation (12) d.v.s. av T_U, Q_R och Q_K, då ju det i grunden är dessa som orsakar variationer i T_U.

Det bör dock observeras att man i detta fall inte kan reglera T_U endast genom framkoppling d.v.s. låta Q_A helt styras av ekvation (12). Ett sådant förfarande kräver nämligen en utomordentligt exakt matematisk modell och att de olika variablerna kan mätas med mycket större noggrannhet än vad som nu sker. Även om dessa krav skulle kunna uppfyllas skulle man få mycket svårt att kompensera för t.ex. förslitning av foderstavar i kvarnen, exakta massan av malkroppar inne i kvarnen o.dyl.

En kombination av framkoppling där man använder sig av ekvation (12) och den vanliga regleringen som man nu använder där man dock undviker tidsfördröjning torde ge det bästa resultatet. Den första regulatorn d.v.s. den i kammare 1 skulle då vara framkopplad och jämnar då ut de stora variationerna som beror på Q_R. Regulator två skulle sedan endast ha en finjusterande funktion d.v.s. korrigera för eventuella brister i den matematiska modellen.

A P P E N D I X

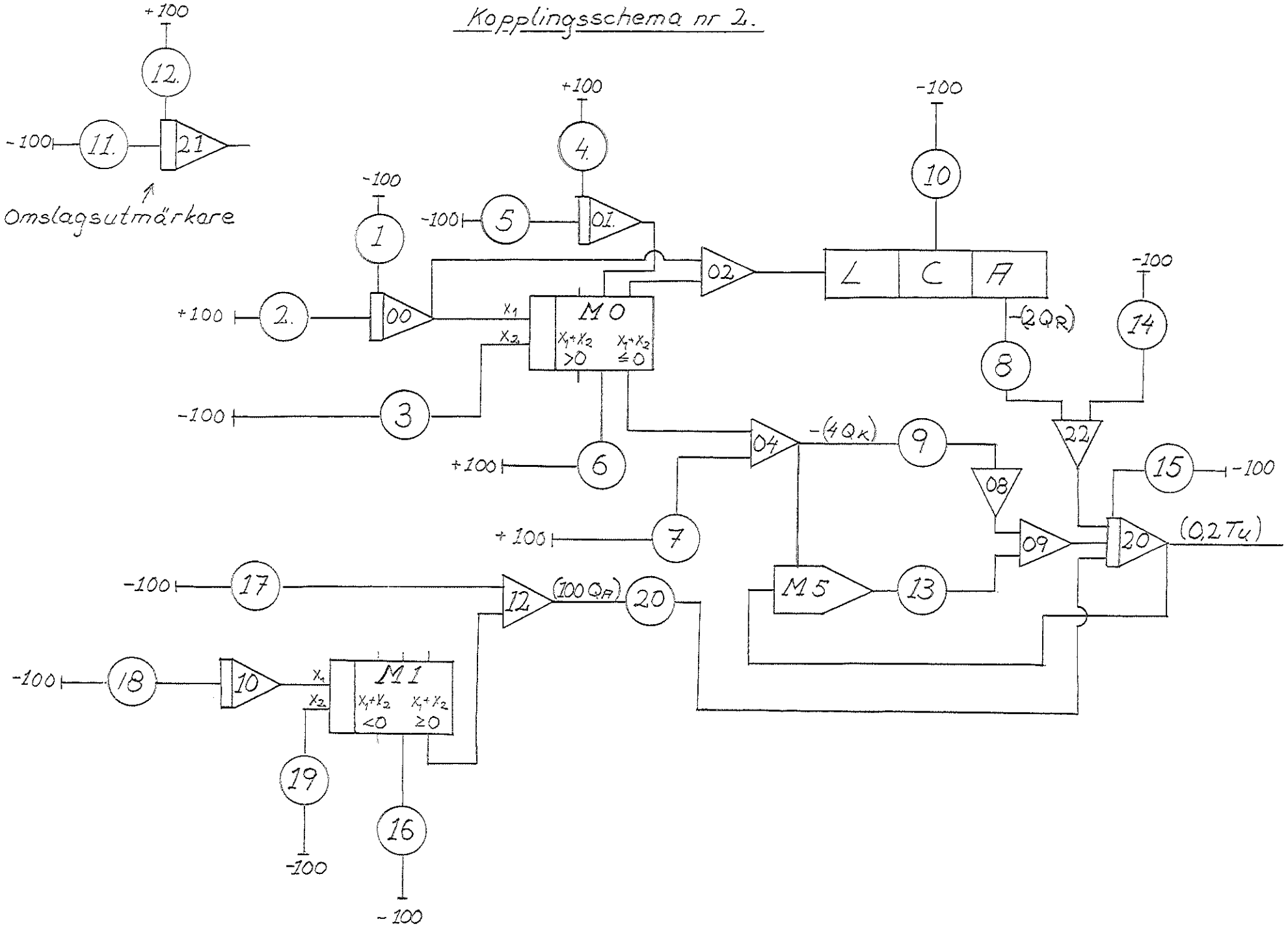
Kopplingsschema nr 1.



Potentiometerlista nr 1.

Pot. nr.	Namn	Värde
1	Q 11	0,827
2	Q 12	0,680
3	Q 02	0,156
4	Q 00	$0,353 \cdot 10^{-1}$
5	P 01	0,126
6	P 00	$0,353 \cdot 10^{-1}$
7	P 12	$0,474 \cdot 10^{-2}$
8	Q 13	0,369
9	Q 22	0,342
10	Q 14	0,169
11	Q 20	0,100
12	Q 01	0,210
13	P 14	0,777

Kopplingsschema nr 2.



Potentiometerlista nr 2.

Pot. nr.	Namn	Värde
1	P00	0,222
2	Q00	0,099
3	Q04	0,0556
4	P01	0,2298
5	Q01	0,1367
6	Q02	0,178
7	P04	0,678
8	Q21	0,156
9	Q08	0,930
10	P02	0,336
11	Q20	0,0100
12	P21	0,0918
13	Q09	0,965
14	Q22	0,1166
15	P20	0,740
16	P10	0,342
17	Q12	0,369
18	Q10	0,010
19	Q14	0,0508
20	P12	0,0047