

ANALYS AV EXTRUDER

STAFFAN WIBERG

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
Oktober 1978

ANALYS AV EXTRUDER

Staffan Wiberg

Utförd vid Institutionen
för Reglerteknik,
Lunds Tekniska Högskola
1978

Handledare:
Jan Holst
Björn Wittenmark

ABSTRACT

Arbetet utgör en undersökning av temperaturförhållandena hos en extruder. I mellanrummet mellan en av värmare upphettad cylinder och en skruv, smältes och matas plast fram för beläggning av förpackningsmaterial. Genom förändringar av cylindervärmen ändras energitillförseln och därmed den frammatade plastens temperatur. Identifiering, utförd på dator, mellan kända börvärdesförändringar på värmarna och plasttemperaturen ger kunskap om systemets förstärkning, egenfrekvenser och tidsberoende. Resultatet visar att en 2:a ordningens modell nöjaktigt beskriver systemet.

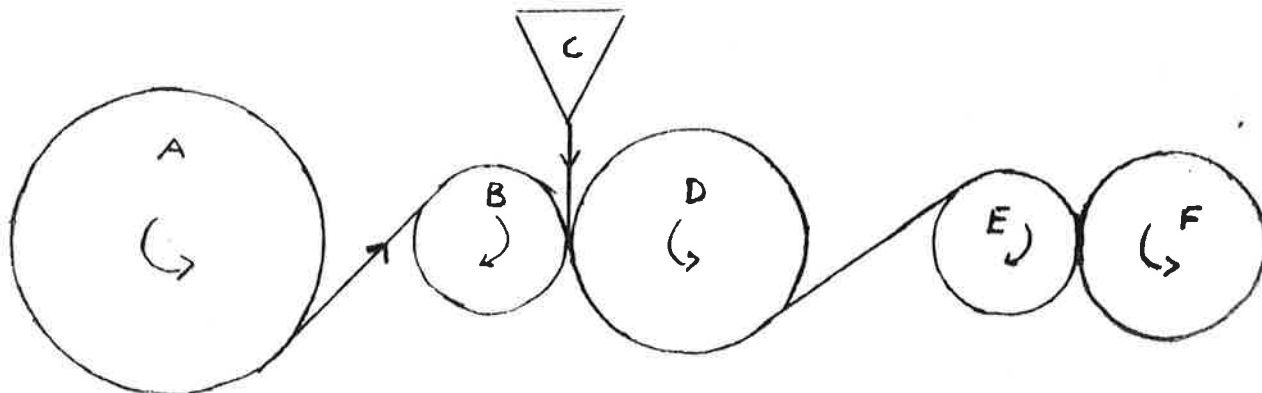
The purpose of this report is to investigate the temperature variations of extruded plastics, meant for coating package products. The resin is melted and pushed forward in the gap between a screw and a hot cylinder, whose temperature can be changed by varying the set-points of temperature controllers. When knowing the set-point variations and the resulting changes in the output temperature of the plastics, the gain, eigenfrequencies and time dependence of this system can be obtained by computerised identification. A second order model will result.

INNEHÅLL

	sid
Inledning	1
Fysikalisk bakgrund	2
Styr signaler	6
Modell	7
Principer för val av insignaler	10
Mätvärdesbehandling	10
Bestämning av insignaler och tidskonstanter	11
Experiment och identifiering	13
Sammanfattning	22
Referenser	23

INLEDNING

Principen för tillverkning av förpackningar avsedda för vätskor typ mjölk eller juice, är mycket enkel. En pappersrulle drages mellan ett antal valsar och belägges med smält plast under passagen till pappersbanans slut, där papperet rullas upp på en axel.



Figur 1. Principskiss över beläggare.

Papperet från rullen A passerar valsarna B, D och E. Från C tillföres smält plast och det belagda papperet rullas upp vid F.

Efter tillskärning i lämpliga bredder kan de belagda och tryckta pappersrullarna "laddas" i maskiner, där förpackningen formas och fylles.

Trots den principiella enkelheten kräves god kännedom om beläggningsprocessen. Plastens jämnhet, tjocklek och temperatur har stor betydelse för att en godtagbar produkt skall erhållas. Den skall kunna motstå kemisk påverkan in- och utifrån och i de fall plasten används för att som "lim" sammanfoga papperet med en aluminiumfolie, kräves god vidhäftning. Här skall plastens temperaturberoende behandlas. Undersökningen syftar till att, i begränsad omfattning, ge bättre kännedom om hur plastens temperatur kan förändras och hur lång tid en avsedd temperaturförändring tar. Uppgiften att tilldela plasten önskad temperatur blir speciellt svår vid produktionsstarter och omställningar och produktionskvaliteten blir ofta undermålig tills

stationaritet uppnåtts.

Undersökningen utföres som ett identifieringsproblem, som utgående från uppmätta utsignaler, kända insignaler och en uppskattning av störningarnas, brusets, inverkan ger underlag för de samband som styr plastens temperatur. Undersökningen är utförd vid extruder 1, beläggare 1 (fabrikat ERWEPA 3665-1) vid AB Tetra Pak, Lund. Förpackningen är av typ Rex, plasten av typ B23L.

Sammanfattning

Inledningsvis beskrives extruderns verkningsätt och hur tillgängliga signaler kan mätas. När modellens utseende och omfattning diskuterats, följer undersökningar, som syftar till att bestämma hur vi kraftfullast kan påverka plasttemperaturen. Ur dessa följer bl a val av insignal. Vid huvudexperimenten insamlas data, från vilka vi kan bestämma förstärkning och tidsberoende mellan in- och utsignaler. Modeller av olika ordningstal testas och tillförlitligheten uppskattas.

FYSIKALISK BAKGRUND

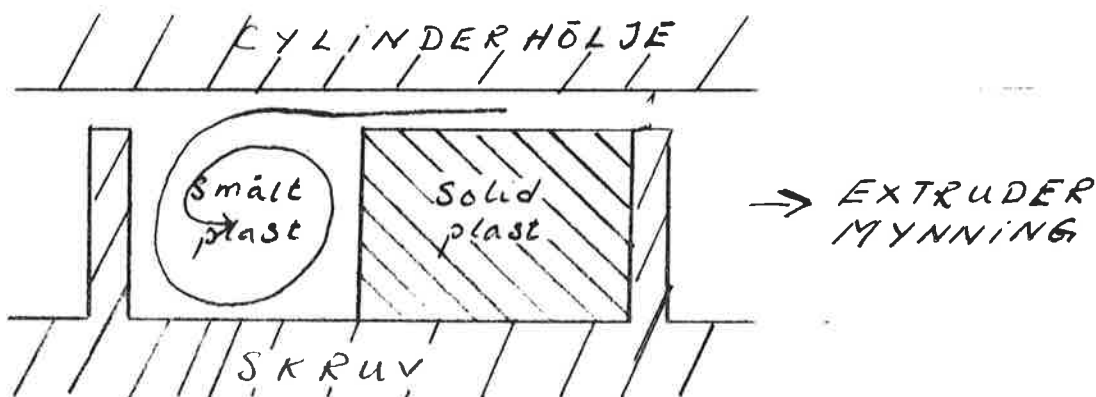
Extrudering är den metod, som idag används för att smälta och transportera plast, och innebär att granulaten smältes, blandas och drives fram i mellanrummet mellan en roterande skruv och dess cylinderformade hölje. Energin som åtgår till smältning tas dels från den vid skruvrotationen uppkommande friktionen, dels från värmeelement placerade längs cylinderhöljet. Via adaptorn når plasten munstycket, där den fördelas jämnt över det förbipasserande papperet.

Under transporten från påfyllningstratten till adaptorn (figur 2) passerar plasten matarzon (plasten i fast fas). Smältzonen (blandning av fast och smält plast) och pumpzonen (mekaniskt väl blandad smälta). För den undersökta extrudern tas den för smältning erforderliga energin från fem, längs cylindern utplacerade värmare och från skruvfriktionen, som tillsammans med det mottryck som en ställbar förträngning i ut-

loppet skapar, även blandar plasten. Hur plasttemperaturen förändras vid börvärdesförändringar på värmarna ingår som en del i den gjorda undersökningen.

Plastens uppförande i extrudern styrs av fysikaliska grundekvationer som värmeledningsekvationer, Navier-Stokes ekvation samt mass- och värmebalansekvationer (1). Allmänt kan sägas att den geometriska utformningen på skruven är av stor betydelse samt att många idealiserade antaganden måste göras för att få någorlunda lätthanterliga samband.

Från matarzonen förs den fasta polymermassan in i smältzonen av de från den roterande skruven härrörande friktionskrafterna. För att polymermassan skall kunna smälta, erfordras värme, dels för att höja dess temperatur till smältpunkten, dels till smältvärme (1). Då cylindertemperaturen är högre än polymermassans smältpunkt, smälter granulaten närmast cylinderytan och ansamlas bakerst i kanalen, vars djup avtar linjärt mot pumpzonen. Värmet till gränsytan mellan smälta och fast plast tillförs dels genom ledning från cylinder, dels genom det friktionsvärme, som alstras då cylinderytan skjuvar den tunna filmen.



Figur 4. Smältning mellan två gängor i smältzonen.

Efter smältzonen når plasten, som nu är i fullständigt smält form, pumpzonen. Här blir kanaldjupet åter konstant.

Det volymetriska nettoflödet i denna zon sammansätts av tre delflöden: 1) Drag flow; 2) Pressure flow; 3) Leakage flow. (Utförligare beskrivning i (1).)

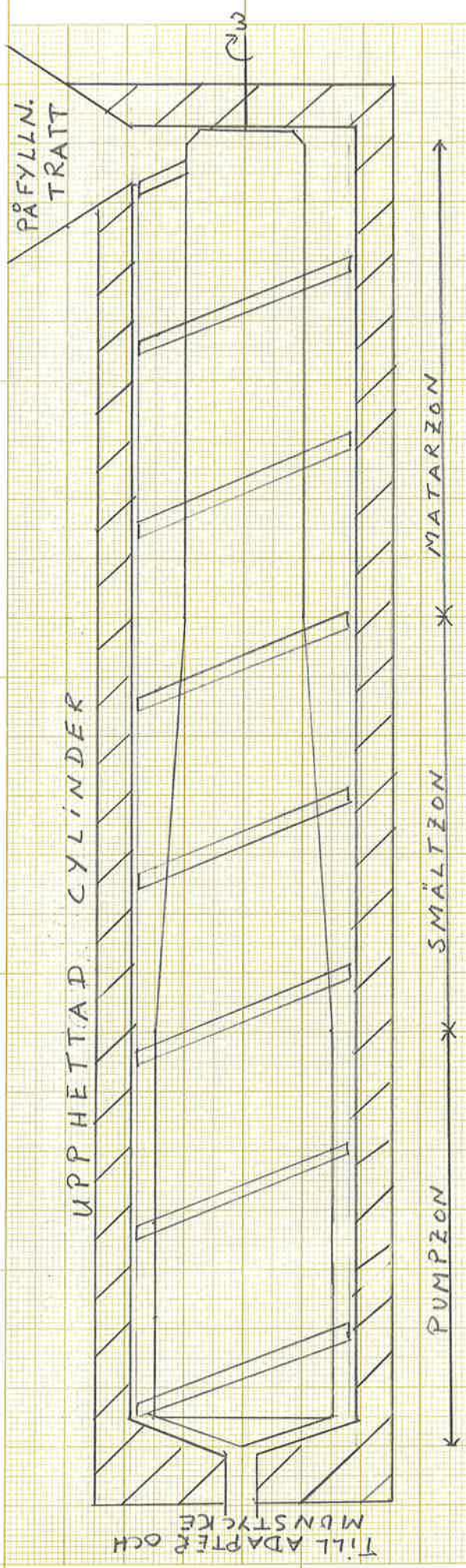


Fig. 2: Principskiss av extruder

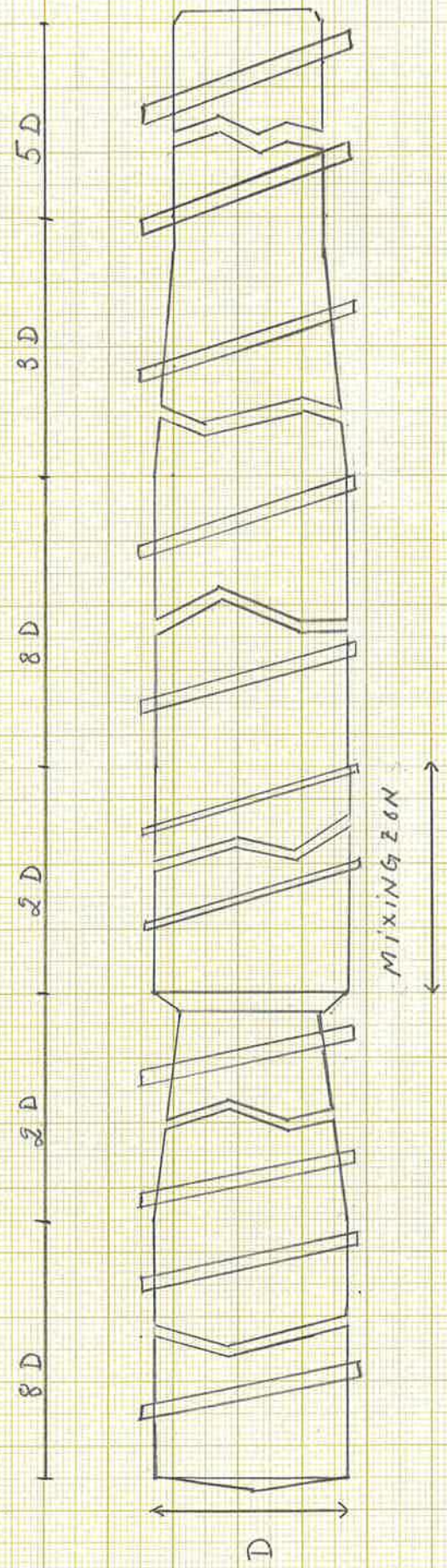
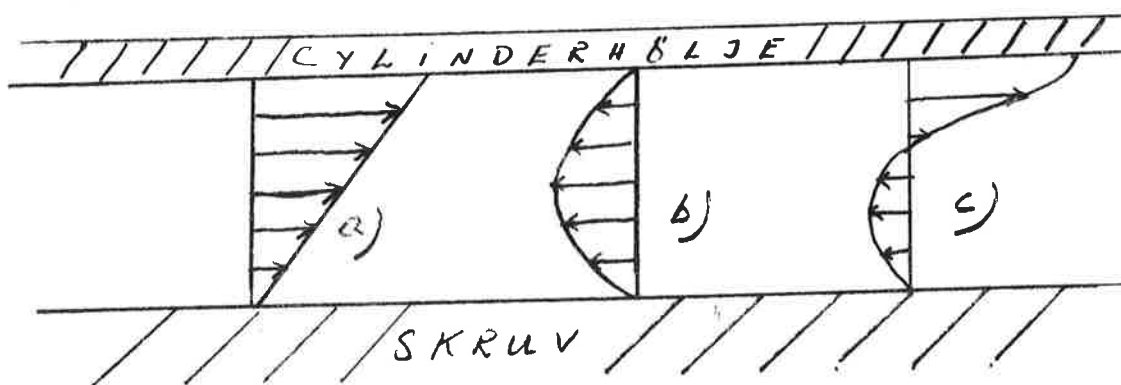


Fig. 3: Den undersökta extrudern, av 2 stegstyp med mixingzon, har en diameter på 6" och ett längd-diameterförhållande på 28/1.

För att få någorlunda lätthanterliga samband härleddes volymkaraktistiken under idealiserade antaganden, både vad plasten och skruvgeometrin beträffar. Plastens viskositet antages vara oberoende av skjuvhastighet (s k Newtonskt medium) och temperatur och dess strömning förutsätts vara laminär och stationär. Geometrin förenklas så att cylinder och skruvytor "plattas ut" och man bortser från kanalens krökning.

- 1) Drag flow är det framåtriktade volymflöde som skulle uppkommit om munstycket ej "hindrat" smältan. Med ovanstående antaganden kan drag flow \dot{Q}_D visas vara proportionellt mot skruvvarvet N .
- 2) Pressure flow \dot{Q}_P är det bakåtriktade volymflöde orsakat av det mottryck i extrudermynningen som åstadkommes med den förträngning en justerbar skruv skapar. \dot{Q}_P är proportionellt mot tryckgradienten i riktningen parallellt med kanalen och omvänt proportionellt mot plastens viskositet.
- 3) Leakage flow \dot{Q}_L är det ofta försumbara volymflöde som uppstår pga att plasten kan "gå tillbaka" i mellanrummet mellan gäng-topp och cylinderyta.

Sammanfattningsvis gäller: $\dot{Q} = \dot{Q}_D - \dot{Q}_P - \dot{Q}_L$



Figur 5. Hastighetsfördelning i skruvkanalens längsriktning vid
 a) enbart drag flow, b) enbart pressure flow,
 c) sammansättning av drag flow och pressure flow.

I pumpzonen är plasten redan smält. Det är detta faktum som gör pumpzonen intressant vid plasttemperaturförändringar. En för-

höjd värmarinställning bör ge större utslag på plasttemperaturen jämfört med bakomliggande zoner, där ju energin även skall smälta granulaten. Den mekaniska skruveffekten i pumpzonen åtgår dels till att skjuva fram mediet och dels till att höja plastens kinetiska energi. Effekten kan enligt (1) visas vara proportionell mot viskositeten, tryckskillnaden över pumpzonen samt kvadratisk beroende av skruvvarvet.

Från skruvdelen förs den smälta, väl blandade plasten över adaptern ner till munstycket där den fördelas över hela munstyckets längd. I både adaptern och munstycket finjusteras temperaturen. Deras geometriska utformning, liksom skruvens, har stor betydelse för plastens temperatur, elasticitet, tryck och volymflöde, som för munstyckets del, enligt (1), är proportionellt mot tryckskillnaden över munstycket och omvänt proportionellt mot viskositeten. Det slutliga flödet ställer in sig på ett värde där skruvens och munstyckets volymflödeskaraktistikor överensstämmer. Där levererar ju skruven lika mycket plast som munstycket kan ta emot.

Antagandena om isoterm strömning och Newtonskt medium stämmer inte i verkligheten. Cylindervärmarna tillför ju smältan ständigt värme men approximationen är fortfarande godtagbar om zonen delas upp i småsegment, vart och ett följande isoterma delförlopp. Aktuella värden på viskositeten insättes då i de förenklade ekvationerna.

Den undersökta skruven visas i Figur 3. Den är av 2-stegstyp, dvs sammansatt av den typ Figur 2 visar och med en mixingzon i förbindningen. Dess diameter är 6" och längddiameterförhållandet är 28/1. Värmeelementen omsluter praktiskt taget helt cylinderns mantelyta. Varje värmare består av 6 stycken halvcirkelformade element av samma konstruktion och täcker 1/5 av skruvens längd.

Anledningen till införandet av det andra steget och mixingzonen är att tryck- och temperaturvariationerna vid utflödesförändringar minskas. Ju längre skruven är, desto mer blandas plasten och strömlinjerören med plast av samma temperatur bryts upp. Flödet i skruvkanalen tenderar annars att cirkulera på ett

sådant sätt att inget eller endast ett litet flöde existerar i kanalens mitt. Om en mixingzon med tätare liggande gängor och grundare kanal införes, förbättras blandningen ytterligare. Se vidare (2).

STYRSIGNALER

För att förhindra nedbrytning av plasten krävs, att dess uttemperatur ej är för hög medan adhesionen, fästförmågan, mot substraten förbättras med högre temperatur. Kompromissen har blivit ca 295 °C. Då munstycks karakteristiken ej beaktas här och mottrycksventilen är fast inställd, återstår enligt föregående kapitel 2 "verktyg" med vilka vi kan tillföra plasten mer energi och på så sätt höja dess uttemperatur.

1) Skruvhastigheten

Den användes i en befintlig tjockleksregulator för att "skruva" fram lagom mängd plast, så att önskad tjocklek erhålles. Den utnyttjas därför ej här. Under normal drift varierar den högst en eller ett par procent. En sådan liten ändring påverkar ej plasttemperaturen på avgörande sätt utan kan anses ingå i bruset. Mellan skruvvarv och plastens uttemperatur anses föreligga ett linjärt förhållande, där riktningskoefficienten är speciell för extrudertypen.

Återstår då:

2) Cylindervärmarna

De är fem stycken till antalet och samtliga försedda med analoga PID-regulatorer. Ändringar i börvärdesinställningen hos dessa är det mest lättillgängliga sättet att utsätta processen för temperaturvariationer.

Tillgänglig mätutrustning

- 1) Termoelement av järn/konstantantyp från temperaturgivarna som ger mätsignaler för regulatorerna till cylindervärmarna. Signalerna är således termospänningar.
- 2) Trycket i adaptern, som är förbindelselänken mellan skruv och munstycke, fås direkt från tjockleksregulatorn (AccuRay).

- 3) Plastens uttemperatur mäts med IR-ljuskamera (AGA Thermo-profile, Model THP-1). Värme (IR-) strålningen från plasten når via ett linssystem och IR-spektralfilter detektorn, vilken är nedkyld till -196°C av flytande kväve. Filtret blockerar ovidkommande strålning utifrån medan kvävet tillser att detektorns, en InSb-fotovoltcell, känslighet blir maximal genom att omgivningens värmestrålning ej tillåts inverka. En termistorkontrollerad temperaturkälla verkar som referens. Differensen mellan spänningarna, svarande mot detektor och referens, förstärks så att linjärt förhållande spänning-temperatur erhålls. Förutom direkt avläsbar i $^{\circ}\text{C}$ på en oscilloskopskärm finns en "sample and hold"-spänning tillgänglig.

Signalerna från 1) och 3) registreras på

- 4) Compact logger 3430-B fabrikt Solartron-Schlumberger på pappersremsa. Loggern ger termospanningarna direkt i $^{\circ}\text{C}$ med en decimal. Känsligheten är 0.3°C . Om omgivningens temperatur ligger utanför intervallet $15-25^{\circ}\text{C}$, tillkommer en temperaturkoefficient $< 0.4\%/^{\circ}\text{C} \pm 2 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. "AGA-kamerans" "sample and hold"-spänning ligger inom felgränserna $\pm(0.03\% + 10 \mu\text{V})$ då $15^{\circ} < T_{\text{omg}} < 25^{\circ}$. Utanför tillkommer ovanstående temperaturkoefficient. Spänningen (V) omvandlas till temperatur (T) enligt: $T = 50 \cdot V + 100$

MODELL

Inledningsvis konstaterades att undersökningen utföres som ett identifieringsproblem. En undersökning baserad på de fysikaliska ekvationer, som styr temperaturen, exempelvis värmelednings-ekvationer, ger en matematisk modell med god fysikalisk insyn. Identifiering, utförd med statistiska metoder, är lättare att utföra men ger mindre fysikalisk insyn och en framtagna modell gäller endast för det undersökta systemet, dvs här just den valda extrudern.

Anledningen till att identifiering används, är de svårigheter som uppstår vid matematiskt modellbygge. Då vi mäter temperaturen i en viss punkt kan vi ej enkelt avgöra hur stor del denna

beror på den enskilda värmarens eller friktionsarbetets inverkan och då dessutom plastens mottaglighet för värme varierar i tid och rum på ett icke i detalj känt sätt kan vi i värsta fall få en uppsjö av modifierade ekvationer med begränsad giltighet. Härtill kommer inverkan från okända och icke mätbara storheter.

Sedan vi definierat vårt system, enligt sidan 6: cylindervärmarnas inverkan på uttemperaturen, beror resultatet av identifieringen på vårt modellval samt experiment- och identifieringsvillkor. I vårt fall sätter vi för det tidskontinuerliga systemet upp en tidsdiskret, parametrisk modell med formen $A y(t) = B u(t) + v(t)$ där $y(t)$ är variationer i plastens uttemperatur, $u(t)$ är variationer i cylindervärmarnas inställning och $v(t)$ är en störsignal, dvs inverkan från brus och fel i vår identifiering. $v(t)$ skall vi i fortsättningen beteckna $\lambda C e(t)$. A , B och C är polynom av ordning n .

Bruset kan tänkas uppstå genom att plastens densitet, värmeledningsförmåga, viskositet osv ej är enhetlig och som förklarar små temperaturförändringar utan motsvarande förändringar i skruvarv, tryck eller värmarinställning. Experimentvillkoret anger hur experimentet utföres, i vårt fall variationer i någon eller några av cylindervärmarnas börvärdesinställning och samtidig registrering av utsignaltemperaturen. Här ingår också val av insignal och tid mellan temperaturregistreringarna (samplingtid T_s). Med identifieringsvillkoret bestämmer vi ordningstal och koefficienter i A , B och C -polynomen. Den här valda metoden kallas Maximum-Likelihoodestimering. En utförligare beskrivning av identifiering ges i (3).

Modellen $A y(t) = B u(t) + \lambda C e(t)$ kan också skrivas;

$$\begin{aligned} y(t) + a_1 y(t-T_s) + a_2 y(t-2T_s) \dots + a_n y(t-nT_s) &= \\ = b_1 u(t-T_s) + b_2 u(t-2T_s) \dots + b_n u(t-nT_s) + \\ + \lambda [e(t) + c_1 e(t-T_s) + c_2 e(t-2T_s) + \dots + c_n e(t-nT_s)] \end{aligned}$$

Dvs den skall ge upplysning om hur uttemperaturen (utsignalen) $y(t)$ vid den betraktade tidpunkten t beror på tidigare utsignal

$y(t-k T_s)$ insignaler $u(t-k T_s)$ och störssignaler $e(t-k T_s)$ och dessutom störssignalen vid tidpunkten t . Störssignalen $v(t)$ har det givna utseendet om det består av vitt, normalfördelat brus $e(t)$ med medelvärde 0 och varians λ^2 (se (3) och (4)).

Om vi åsätter vår okända parametervektor $\theta = [a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_n, c_1 \dots c_n]$, som vi alltså vill skatta, mer eller mindre väl valda startvärden och använder insignaler och tidigare kända utsignaler, kan vi prediktera utsignalen kommande samplingsstillfälle $y(t+1|t, \theta)$. Skillnaden mellan uppmätt och predikterad utsignal, residualen $\varepsilon(t)$, blir då ett mått på hur väl vi gissat θ . Förfarandet upprepas för alla N mätdata. Förlustfunktionen $V_N(\theta) = \sum_1^N \varepsilon^2(t) = \sum_1^N [y(t) - y(t|t-1, \theta)]^2$ blir allt mindre ju bättre θ är, dvs då modellen överensstämmer med systemet. Vi skall alltså minimera $V(\theta)$ m a p θ .

Om bruset och residualerna är normalfördelade med medelvärde 0 och skattad varians $\hat{\lambda}^2$ blir frekvensfunktionen (Likelihoodfunktionen) enl (3):

$$L = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \hat{\lambda}^N} \exp(-V(\theta)/2\hat{\lambda}^2)$$

Med Newton Raphson's metod itereras det θ fram som ger $V'(\theta) = 0$, dvs minimum av $V(\theta)$:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{V'(\theta_k)}{V''(\theta_k)}$$

Som skattning av brusets varians tas $\hat{\lambda}^2 = \frac{V(\theta)}{N}$

Pga brusets inverkan kommer $V(\theta)$ att minska med ökande ordningstal n men minskningen blir obetydlig över visst n -värde.

$$\text{Med } \begin{cases} V(\theta) = V_1 & \text{för } n = n_1 \\ V(\theta) = V_2 & \text{för } n = n_2, n_2 > n_1 \end{cases}$$

testas $\mathcal{T} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \frac{N - n_2}{n_2 - n_1}$ som är F-fördelat

Om \mathcal{T} är litet accepteras n_1 .

Vid varje avslutad parameteruppskattning kan residualerna beräknas. Om de är små och lika många antar positiva som negativa värden är det rimligt att anta att systemet är av ordningen n .

PRINCIPER FÖR VAL AV INSIGNAL (se (5)).

För att få en konsistent skattning, dvs en modell som närmar sig systemet då antalet mätdata växer måste brusets $e(t)$ vara vitt och insignal och brus måste vara oberoende (3,4). Insignalen måste vidare omfatta de frekvenser (tider) som exciterar systemets moder. Utsignalen bör ha en så stor amplitud att vi kan skilja dess inverkan från brusets. Vitt brus uppfyller dessa fordringar men ur praktisk synpunkt är det lämpligare att välja en PRBS (Pseudo Random Binary Sequence)-signal. Genom ett återkopplat skiftregister med $2^n - 1$ tillstånd genereras en deterministisk signal med amplitud $+a$ eller $-a$. Den kortaste sekvensen med amplitud $+a$ eller $-a$ är T_p (grundperiod), den längsta $n T_p$. Efter $(2^n - 1) T_p$ upprepas förloppet. Insignalens frekvenser ligger således mellan $\frac{1}{(2^n - 1)T_p}$ och $\frac{1}{T_p}$. Från dessa samt från samplingstiden T_s kan utsignalens frekvensintervall uppskattas. Valen av n , T_p och T_s i sin tur av tidskonstantmätningar på processen. För att den längsta tidskonstanten T_{\max} skall slå igenom på utgången kan man enligt (7) välja $3T_{\max} = nT_p$. Vidare väljes samplingstiden T_s ungefär som kortaste tidskonstanten. Dessutom gäller $T_p \approx 7T_{\min}$.

Den lägsta frekvensen vi möjligtvis kan se på utgången är lika med den lägsta frekvens vi har på ingången. Den högsta utfrekvensen vi kan anse som tillförlitlig bestäms däremot av samplingstiden och uppfyller $f_N = \frac{1}{2} \frac{1}{T_s}$. Sammanfattningsvis ligger våra utfrekvenser i intervallet $\left[\frac{1}{(2^n - 1)T_p}, \frac{1}{2T_s} \right]$

MÄTVÄRDESBEHANDLING

Erhållna mätvärden har stansats på hållremsa och överförts till datafiler på institutionens processdator PDP-15, vars identifieringsprogram IDPAC har utfört Maximum-Likelihoodestimeringen. Utförlig förklaring, se (6).

BESTÄMNING AV INIGNALER OCH TIDSKONSTANTER

I enlighet med vad som konstaterades på sid 10, måste förberedande mätningar utföras. Genom att utsätta de fyra, mot extrudermyningen närmast belägna cylindervärmarna, för börvärdesändringar, kan respektive värmares genomslagskraft på uttemperaturen bestämmas. Förutom nödvändig storlek på börvärdesändringen får vi även kunskap om hur snabbt systemet ställer in sig på det stationära värdet och ifall transportfördröjningar förekommer. Framförallt är det viktigt att uppskatta de tidskonstanter, som systemet synes omfatta då ju detta ger oss underlag till bestämning av samplingstid och varaktighet av PRBS-signalen. Slutligen måste variationer hos skruvhastigheten kontrolleras så att de inte ger upphov till för stora störningar.

Då temperaturstegen lägges på, måste samtliga temperaturer ligga på sina stationära värden. Vid ett stillestånd går skruven "på tomgång" och endast en liten mängd plast matas ut, varför värmeförseln strypes. Då plastutmatningen åter blir normal sjunker cylindertemperaturen, eftersom den större plastmängden tar upp mer energi än värmarna förmå avge.

	VÄRMARE				
	1	2	3	4	5
Börvärde ($^{\circ}\text{C}$)	220	280	310	310	310
Börvärdesändring ($^{\circ}\text{C}$)	-	± 15	± 15	± 15	± 15

Figur 6. Värmarnas normala börvärden och förändringar av dessa utförda vid försöket.

Börvärdet ändrades för en värmare åt gången enligt Figur 6 och temperaturen för denna samt intilliggande värmare registrerades på en skrivare (punkt 1, sid 6), samtidigt som uttemperaturen visuellt avlästes på termokamerans (punkt 3, sid 6) oscilloskopskärm. Efter en börvärdesändring från exempelvis 310°C till 325°C lades, i de fall stopp ej omöjliggjorde detta, det negativa steget på till 295°C så att amplituden blev 30°C . Under försökets gång var skruvhastigheten i det närmaste konstant, 104 rpm. Enstaka gånger avlästes värdena 103.8 rpm och 104.2 rpm.

Resultatet visas i diagram I-VIII, där T_x anger temperaturen hos värmare x och y plastens uttemperatur. Notabelt är att temperaturerna på den kalibrerade skrivaren ej visar sina förskrivna stationärvärden samt att stegen ej exakt är 15°C . Detta kan till viss mån förklaras av svårigheten att på den analoga skalan ställa in avsett värde.

TABELL 1.

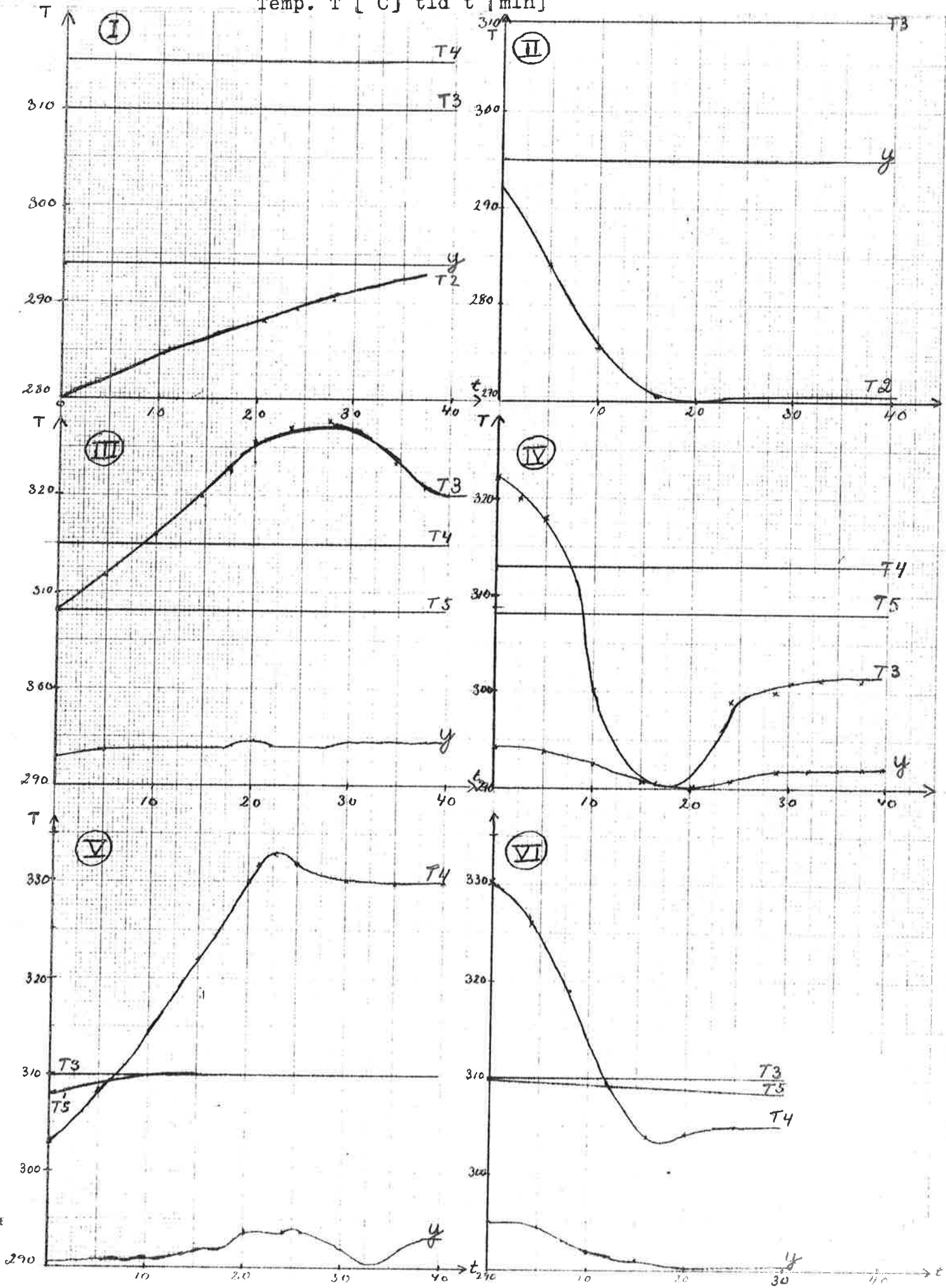
Diagram	Ändrad värmare	Börvärdesändring $^{\circ}\text{C}$	Stationaritet Värmare min	Uttemp min	Uttemp förändring $^{\circ}\text{C}$
I	2	+ 15	> 45	-	0
II	2	- 30	17	-	0
III	3	+ 15	40	30	1.5
IV	3	- 30	30	30	1.5
V	4	+ 30	30	40	2.5
VI	4	- 30	22	20	5
VII	5	+ 15	20	18	4
VIII	5	- 30	18	22	8

Från diagrammen framgår att, med något undantag, en förändrad värmarinställning ej påverkar omgivande värmares temperaturer. Den förhöjda effekten tillförs plasten, som smälter och/eller ökar sin temperatur. Då vi som insignal bör välja den eller de värmare, där en börvärdesändring fortast ger den största uttemperaturförändringen, följer att värmarna 2 och 3 är olämpliga. Vid en jämförelse mellan värmarna 4 och 5 visar den senare en större uttemperaturförändring och i medeltal en större snabbhet, varför värmare 5 i första hand bör väljas som insignal. Uppvärmningsförloppet är där, enligt diagram VII och VIII, något snabbare än avsvlningsförloppet medan uttemperatur och transportfördröjningen är lika stora. Vid en börvärdesförändring $\pm 10^{\circ}\text{C}$ förändras uttemperaturen $2.5-3^{\circ}\text{C}$. Detta är tillräckligt för att vi skall kunna skilja uttemperaturförändringar från brusets inverkan samtidigt som produktkvaliteten ej äventyras.

Efter ca 4 min reagerar uttemperaturen på insignalsteget. Då börjar den stiga med tiden som $(1-e^{-t/T})$. T_{stat} , där T_{stat} är det stationära värdet och T tidskonstanten. Då $t = T$ fås $(1-e^{-1}) \cdot T_{\text{stat}} = 0.63 T_{\text{stat}}$ och T kan bestämmas. Den längsta

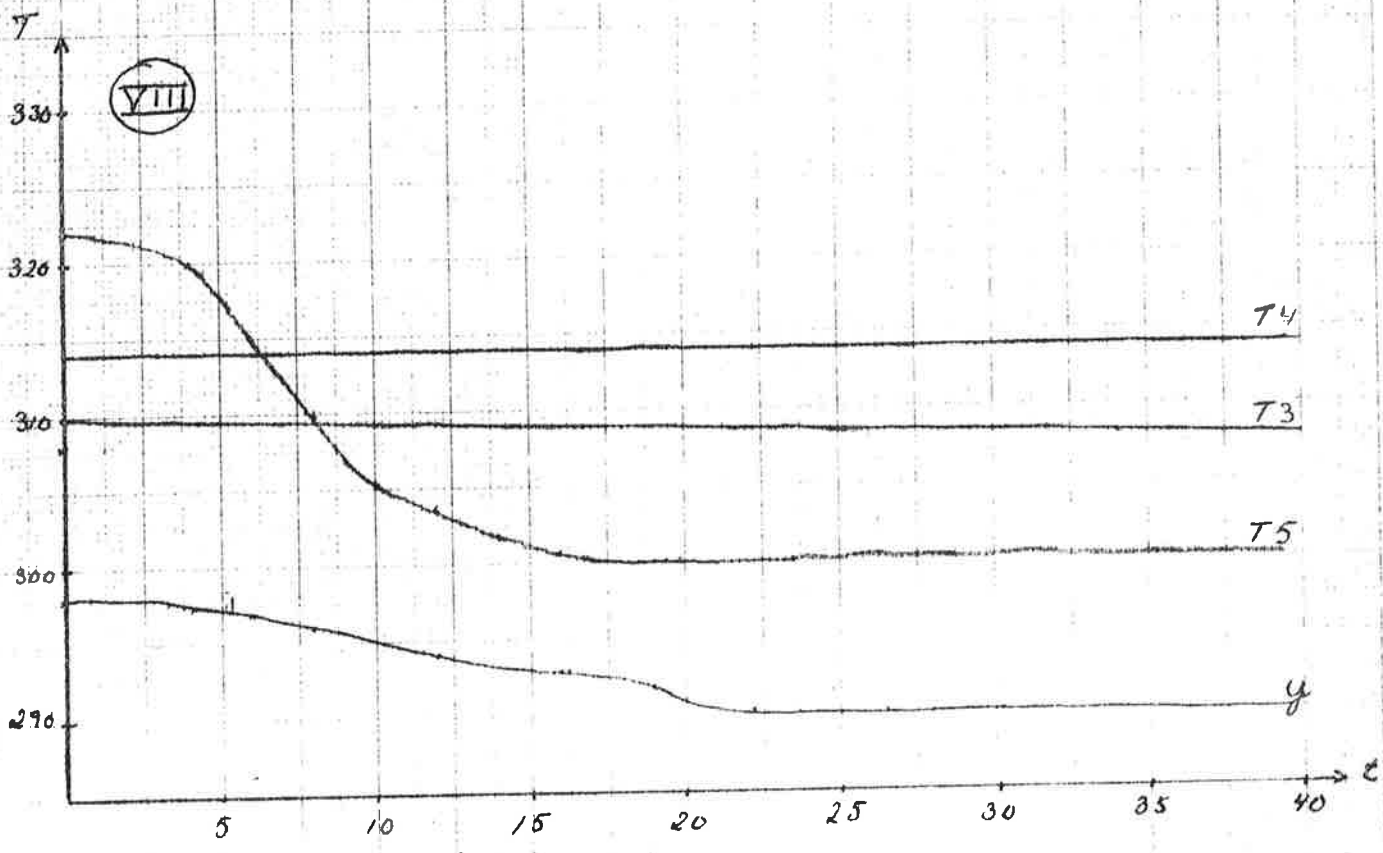
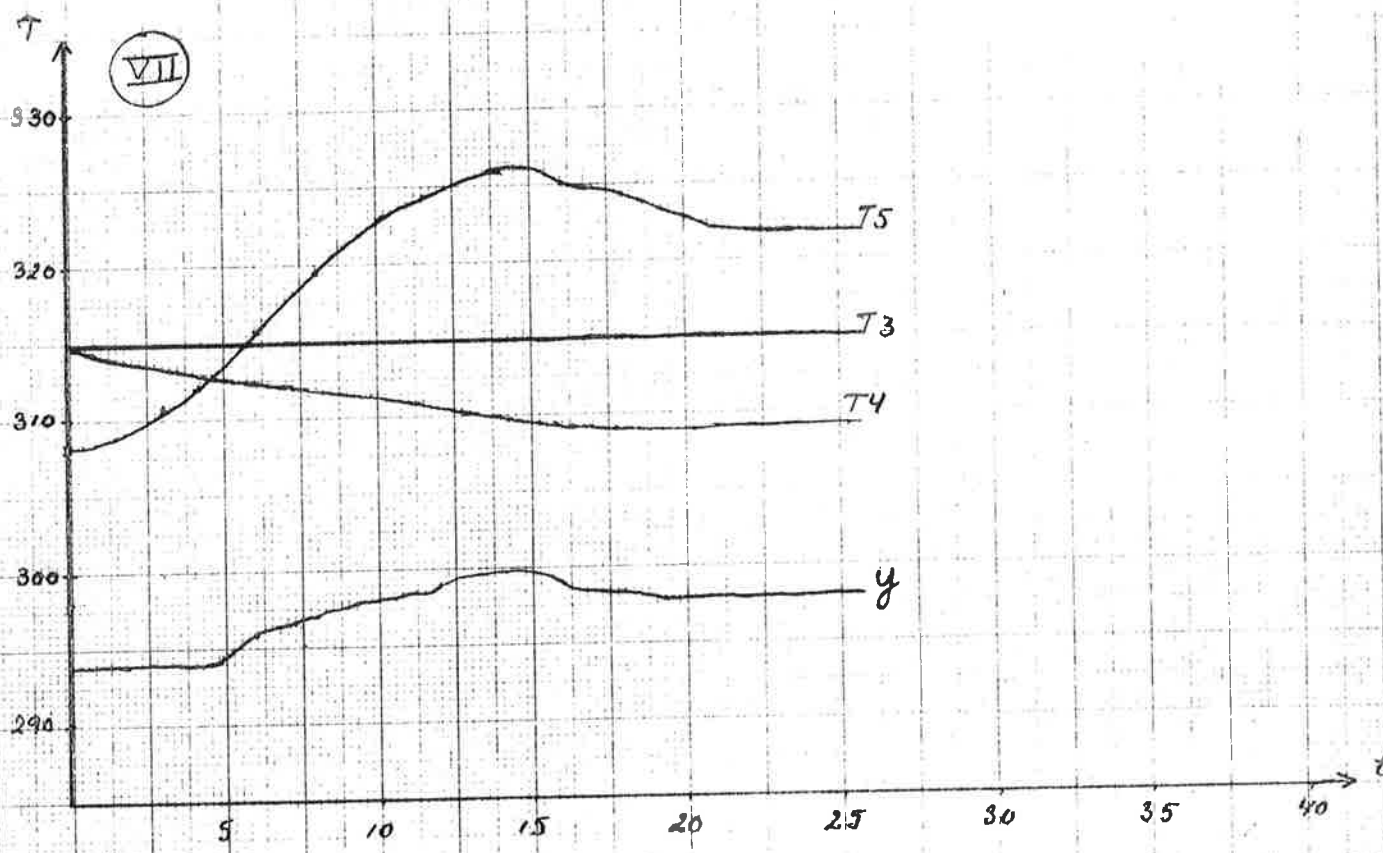
Diagram I - VI

Plasttemperatur y och värmartemperaturer T_x
 som funktion av tiden vid börvärdesändringar
 Temp. T [$^{\circ}\text{C}$] tid t [min]



ESSELTE 4441

Diagram VII - VIII Plasttemperatur y och värmartemperaturer T_x som funktion av tiden vid börvärdesändringar
 Temp. $T(^{\circ}\text{C})$ tid t (min)



73 25 01 - 514 A4 - 1 \ 1 mm

tidskonstanten T_{\max} avläses vid stegsvaret diagram VII till ca 3 min.

I en PRBS är den längsta sekvensen med samma amplitud lika med $n T_p$ (se sid 10 och (5)). Om vi vill se tidskonstanten T_k bör vi välja n och T_p så att $n T_p = 3T_k$. För T_{\max} ger detta $n T_p \approx 10$ min. Den kortaste tidskonstanten kan vara svår att uppskatta men om vi samplar tillräckligt ofta, bör systemets snabbaste moder framgå. Väljes samplingstiden T_{samp} till 30 sekunder, blir PRBS-signalens grundperiod T_p , enligt regeln $T_p \approx n T_{\text{samp}}$, lika med 90 sekunder och n kan sättas till 7. Nyquistfrekvensen blir $f_N = \frac{1}{2} \frac{1}{T_{\text{samp}}} = 16 \cdot 10^{-3}$ Hz.

För vår PRBS-insignal gäller sammanfattningsvis:

Amplitud: $\pm 10^\circ\text{C}$

Grundperiod: $T_p = 1.5$ min

Längsta sekvens med samma amplitud: $7 \cdot 1.5 = 10.5$ min

Kortaste sekvens med samma amplitud: 1.5 min

Samplingstid: 30 sekunder

Högsta frekvens (Nyquistfrekvens): $1.6 \cdot 10^{-2}$ Hz

Lägsta frekvens: $\frac{1}{(2^7-1) \cdot 90} \approx 8.8 \cdot 10^{-5}$ Hz

EXPERIMENT OCH IDENTIFIERING

En identifiering kan anses tillfredsställande om förlustfunktionen visar minimum och dess gradient är mycket nära noll. Vidare bör andraderivatmatrisen till förlustfunktionen vara positiv definit, dvs alla dess egenvärden skall vara positiva och om man har tillgång till parameterestimatens kovariansmatris kan man testa modellens tillförlitlighet. Jämförelser mellan utsignaler från experiment och modell, även stegsvar, samt storlek på och antalet teckenväxlingar hos residualerna (se sid 9) ger också en uppfattning om hur bra modellen är. Ofta förbättras resultaten om den efter en identifiering (max 20 iterationer) erhållna modellen får utgöra startvärde för en ny.

Arbetsgången vid identifieringen har varit följande:

Genom att förskjuta insignalen ett eller flera samplingsintervall i förhållande till utsignalen, bestämdes transportfördröj-

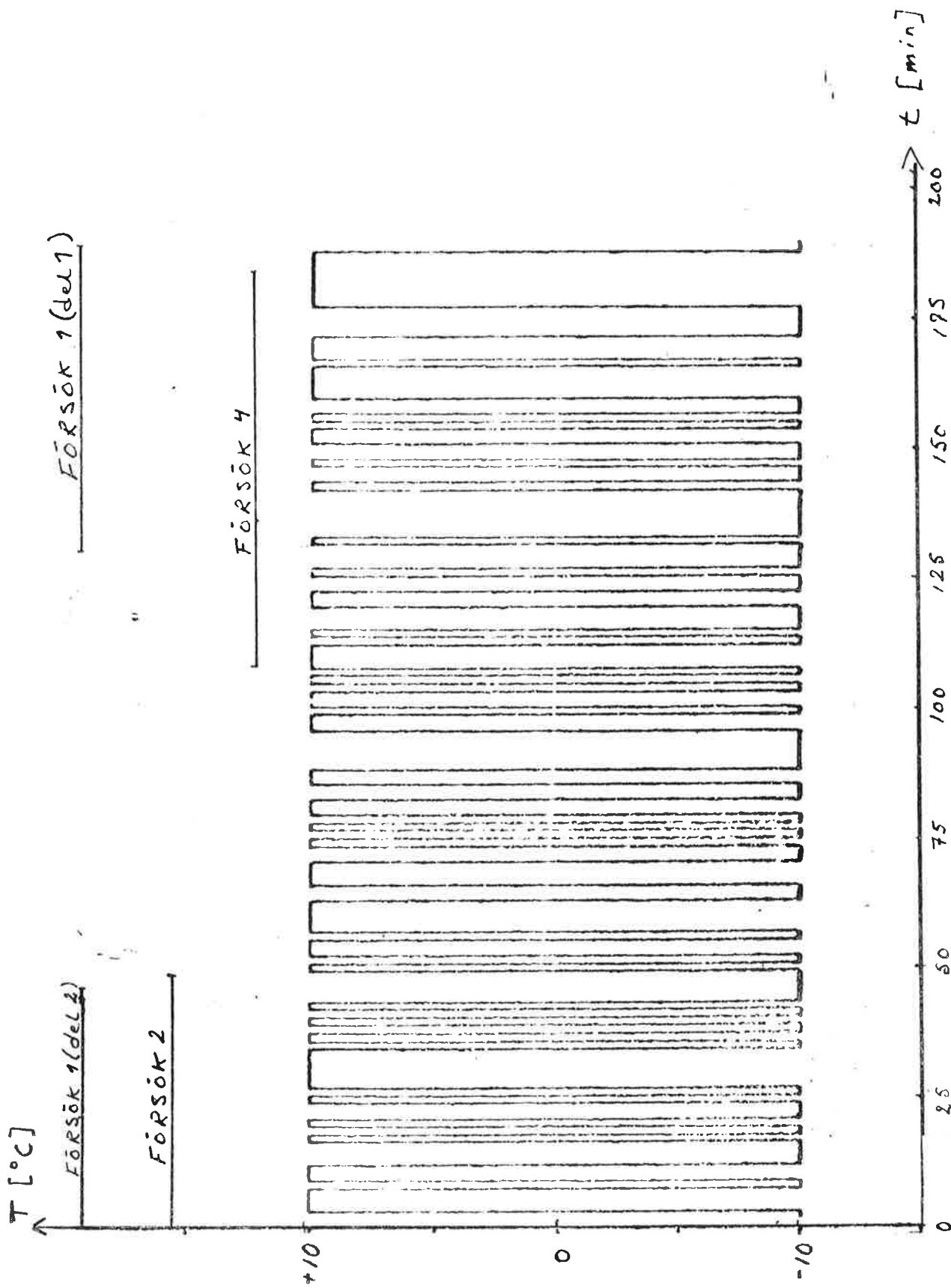


Fig. 7: PRBS-signal med amplitud $\pm 10^\circ\text{C}$. Insignal till försök 1, 2 och 4 är angivna.

ningen, dvs hur lång tid det förflyter innan utsignalen reagerar på insignalen. En identifiering för varje ordningstal utfördes. Härefter genomfördes nya iterationer på data med rätt fördröjning tills modellen ej ändrades.

Pga stopp eller produktionsomläggningar var det ej möjligt att i en enda sekvens genomföra alla börvärdesändringarna enligt Figur 7. Istället utfördes 5 försök, som visas i Figurerna 8-12, där temperaturerna från värmarna 3, 4 och 5 (vars börvärde ändrades) samt uttemperaturen registrerades på skrivaren enligt 4, sid 6). Av försöken uppvisar två, försök 3 och 5, stora variationer inte bara hos värmare 5 utan även hos värmare 3. De har påbörjats innan stationaritet förelåg. Identifieringen skiljer sig avsevärt från de övriga försöken och även sinsemellan och resultaten beaktas ej.

De tre återstående försöken (1, 2 och 4), vars insignaler ges i Figur 7, uppvisar en med tiden stigande medeltemperatur. Då insignalerna skiljer sig åt, är lutningen ej enhetlig men genomgående förbättras identifieringsresultaten om en 1:a gradstrend borttages från utsignalen. Försök 1 har som insignal 36 grundperioder på $+10^{\circ}\text{C}$ och 33 grundperioder på -10°C , utgående från det normala börvärdet på 310°C . Motsvarande för försök 2 respektive 4 är 16 och 14 respektive 24 och 27. De borttagna trenderna är sådana att temperaturen på 1 timme ökar med respektive 1.62°C , 1.52°C och 0.76°C . Detta tyder på att uppvärmnings- och avsvlningsförloppen är olika till sin karaktär, så att systemet vid en börvärdessänkning innehåller en integrator med en större tidskonstant jämfört med en ökning av samma belopp. Jämföres stegsvaren, diagram VII och VIII, konstateras att $T_{\text{stat}} e^{-1}$ (ca 63% av stationärvärdet) inträffar efter ca 7 min för uppvärmningssteget och efter ca 16 min för avsvlningssteget. Genom att identifieringen ger ett allmänt temperatursamband vid börvärdesändringar kan vi ej skilja ut tidskonstanterna vid uppvärmning och avsvlning. Identifieringar med 2:a gradstrender borttagna visar sämre resultat.

Figurerna 8-12 visar på en stor samhörighet mellan variationerna på värmare 5 och uttemperaturen. Identifiering ger också bäst resultat vid direktpåverkan, dvs när värmare 5 väl nått sitt nya

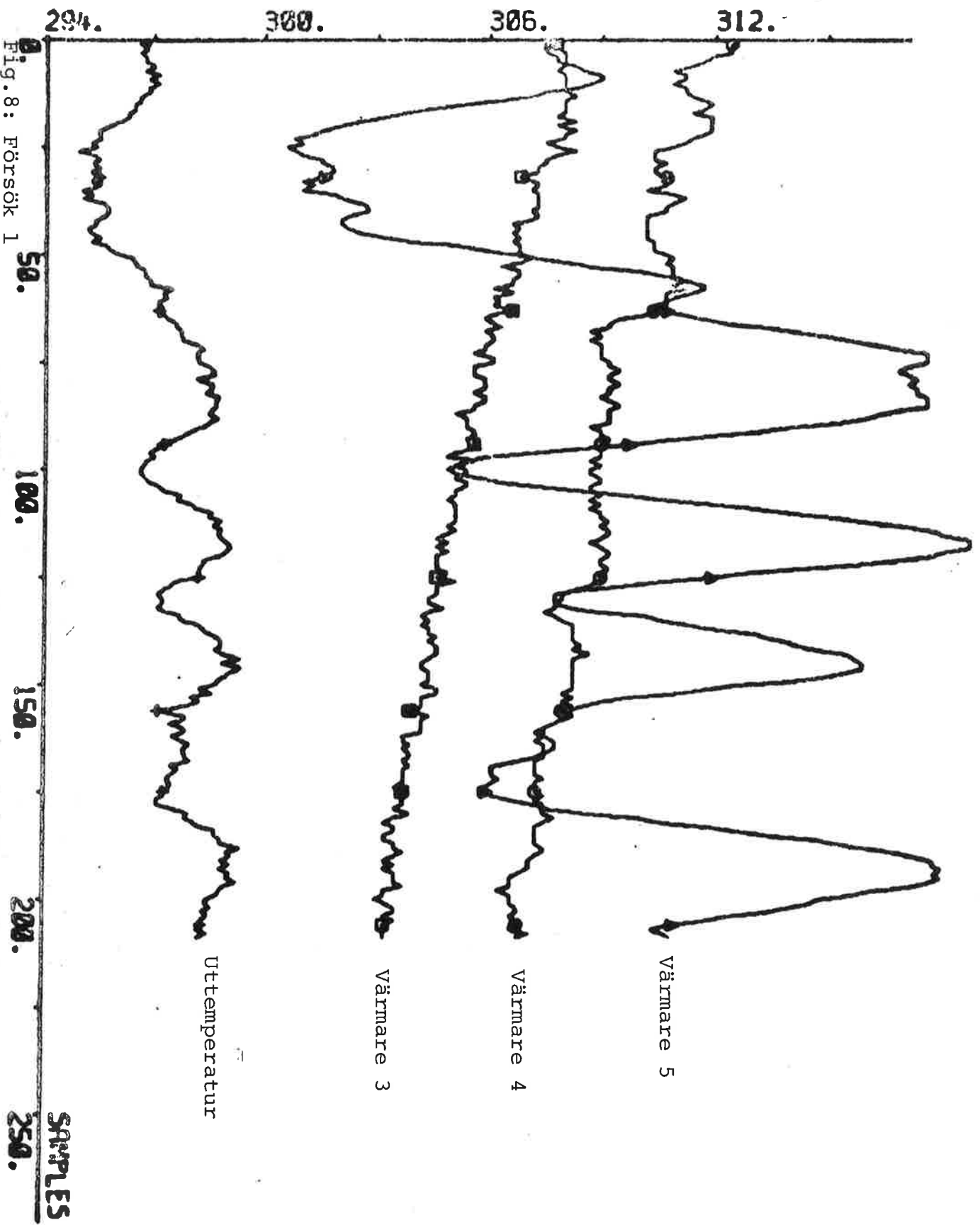


Fig. 8: Försök 1

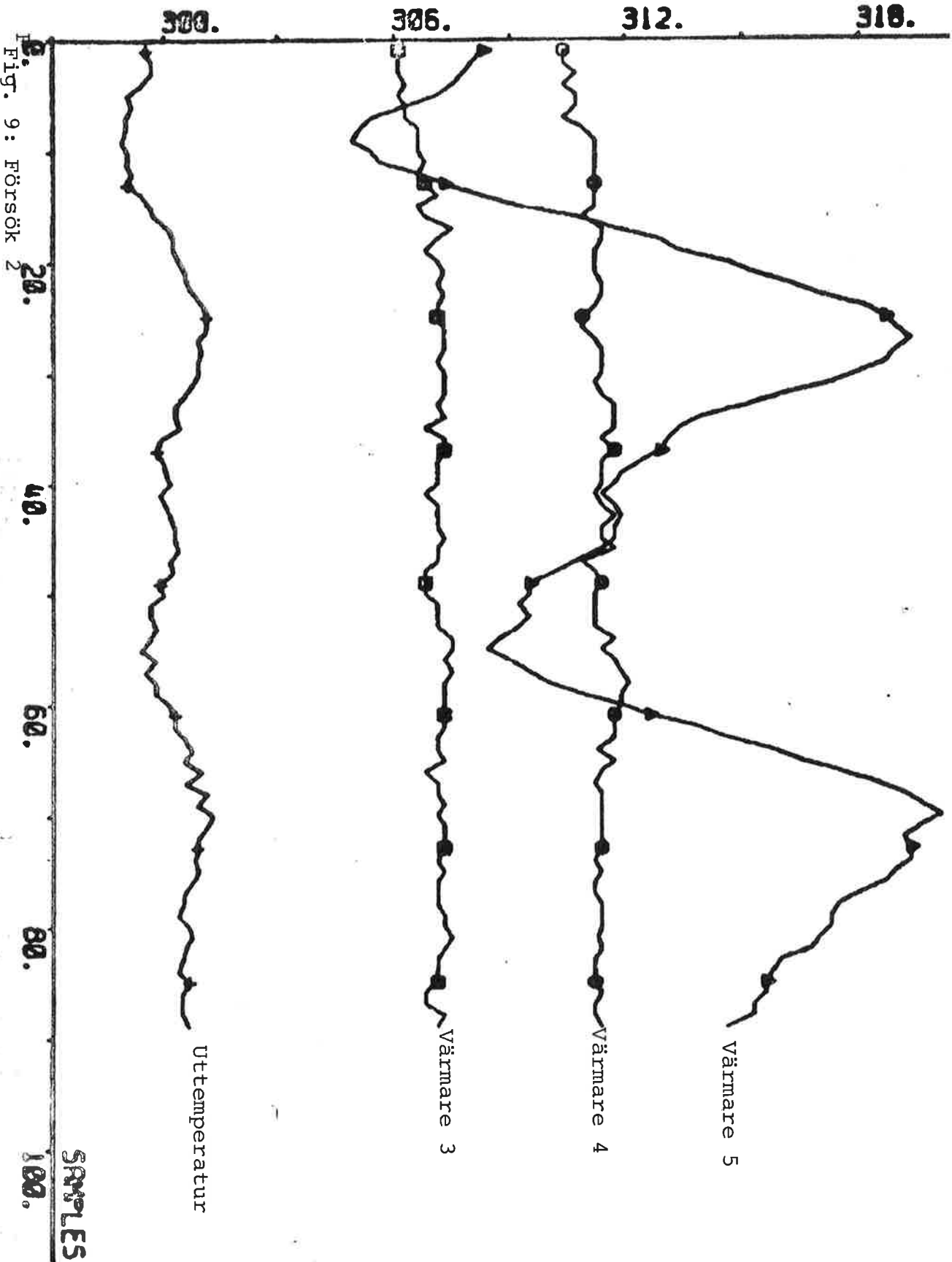


Fig. 9: Försök 2

SAMPLES

Uttemperatur

Värmare 3

Värmare 4

Värmare 5

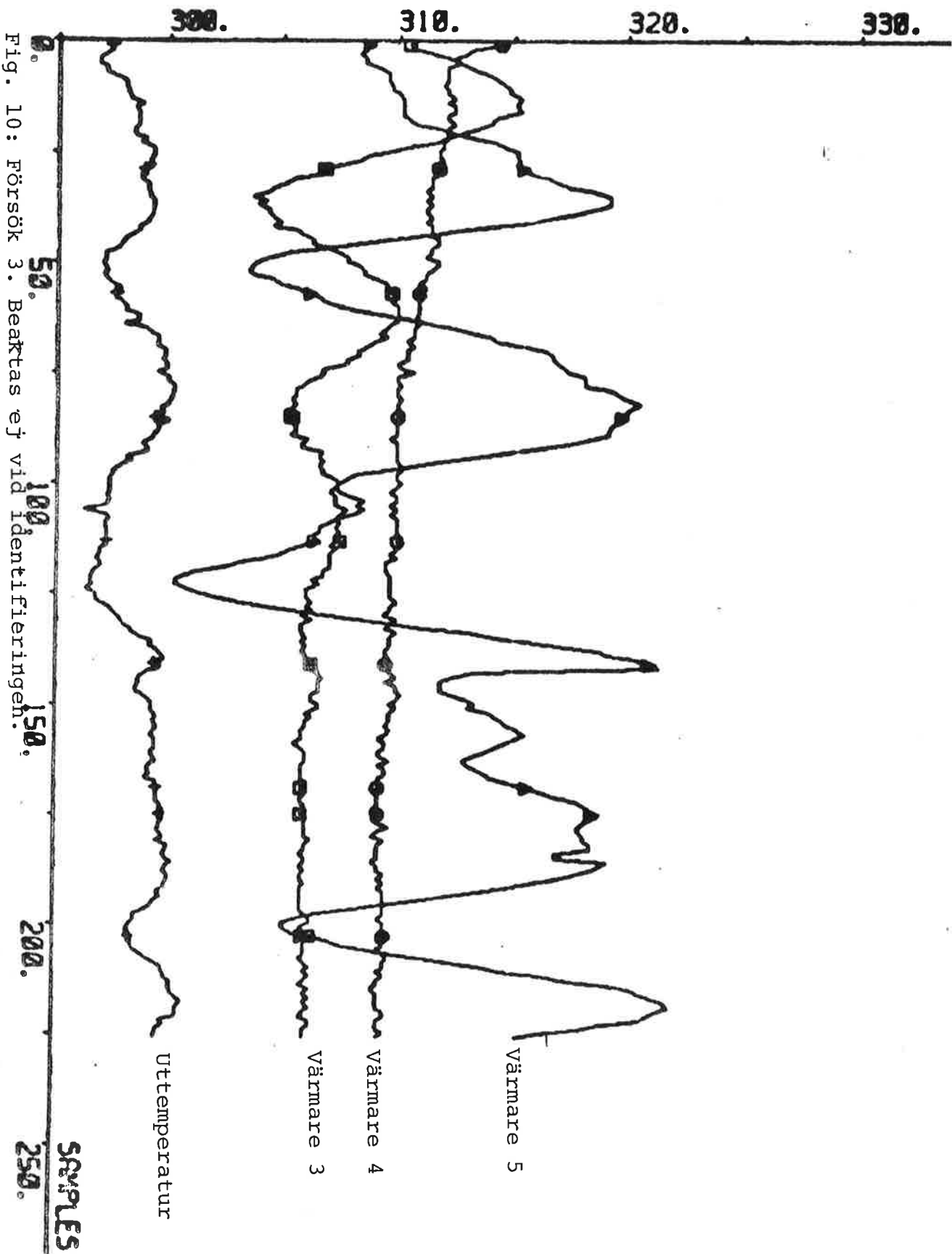


Fig. 10: Försök 3. Beaktas ej vid identifieringen.

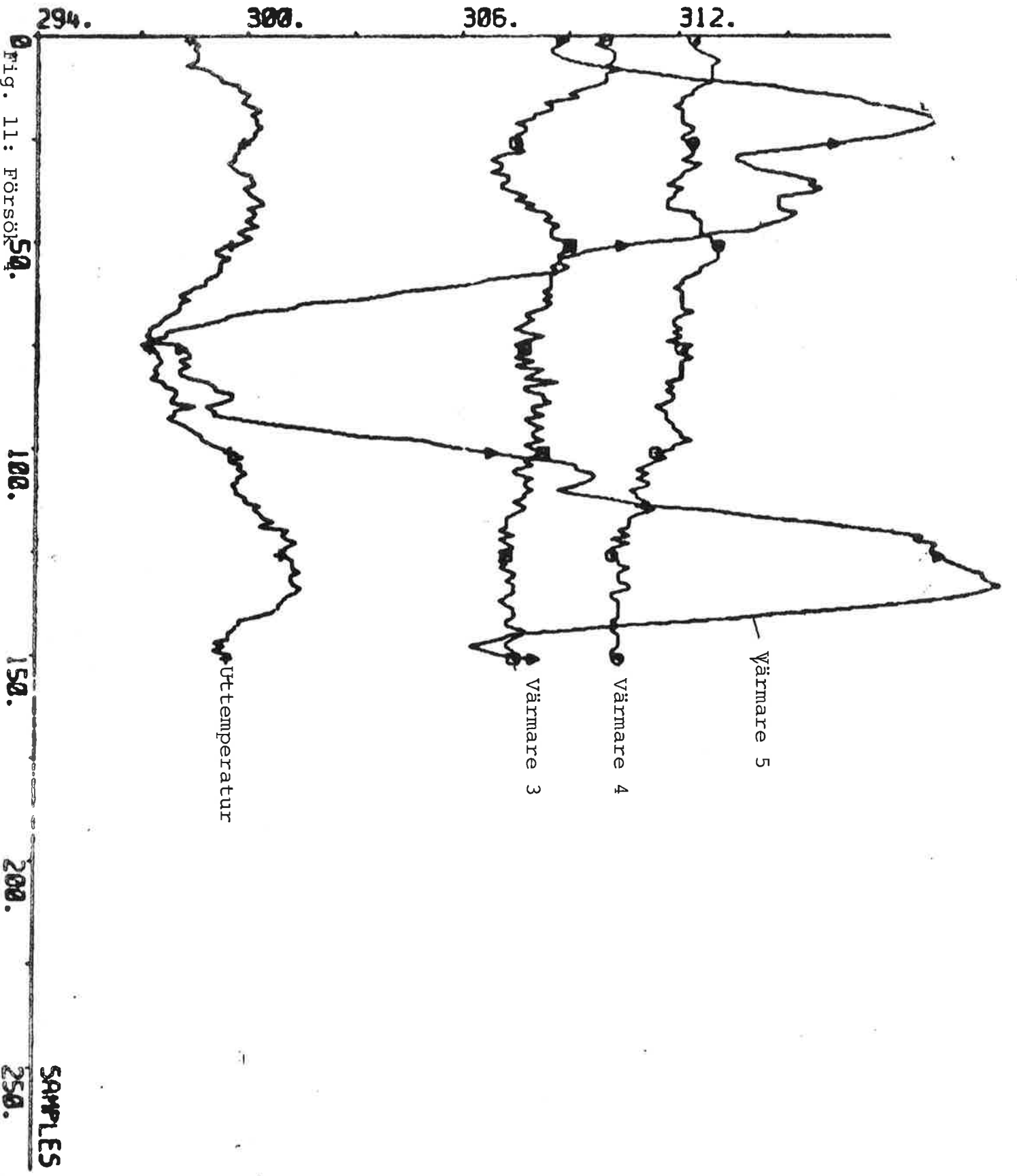


Fig. 11: FÖRSÖK 54.

SAMPLES

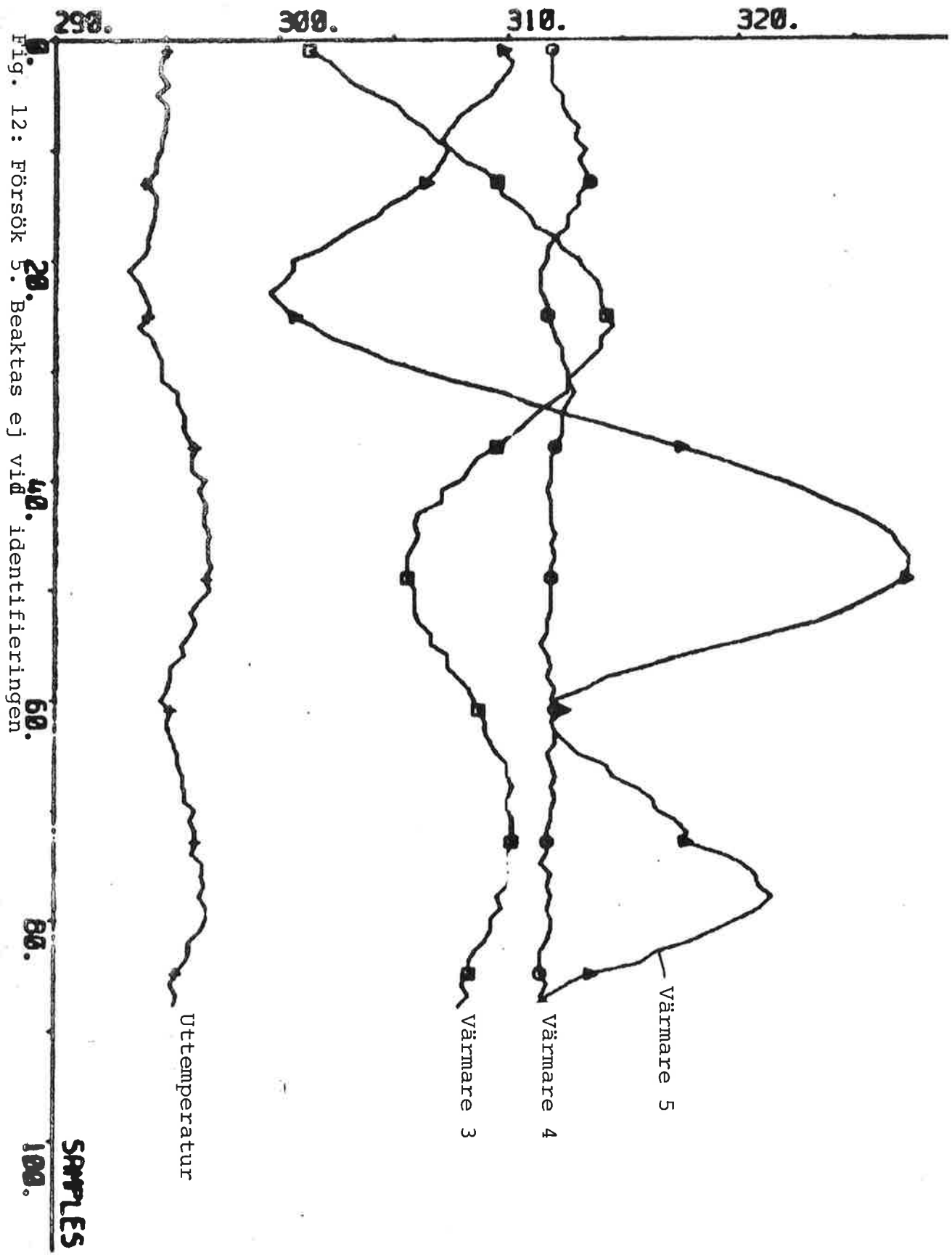


Fig. 12: Försök 5. Beaktas ej vid identifieringen

börvärde överförs energin inom 30 sek till plasten, vars temperatur stiger. Den mera komplicerade delen av processen är således själva förändringen av cylindertemperaturen vid börvärdesförändringen.

Vid bestämning av transportfördröjningen utfördes en identifiering för varje ordningstal. 1:a ordningens system och fördröjningar, större än 120 sek samt direktpåverkan, kan direkt utslutas. Förlustfunktionen försök 1 blev:

TABELL 2. Förlustfunktionen försök 1 då trend $296.115 + 0.013x$ borttagits från utsignalen.

Ordning	Fördröjning (sek)			
	30	60	90	120
2	4.52	5.15	4.99	4.46
3	4.30	4.10	3.89	3.85
4	4.10	3.93	3.65	3.76
5			3.81	

Bara i enstaka fall var samtliga egenvärden till förlustfunktionens 2:a derivatmatris positiva, dvs konvergensen var dålig. Vid undersökning av residualernas storlek syns en märkbar minskning vid 90 sek fördröjning. Någon större skillnad mellan residualerna vid olika ordningstal finns däremot inte. De största residualernas ursprung (storlek $0.4-0.7^{\circ}\text{C}$) kan spåras i mätdatan, där de ofta skarpt bryter en klar trend. Vid jämförelse mellan utsignalen från modell och experiment syns en klar förbättring då ordningstalet är större eller lika med 2. Vid ökande ordningstal blir förbättringen marginell. Undersökningen av antalet teckenväxlingar hos residualerna, som är ett ganska svagt konvergenstmått, ger inga utslagsgivande resultat.

Försök 2 gav:

TABELL 3. Förlustfunktionen försök 2 då trend $299.614 + 0.012x$ borttagits från utsignalen.

Ordning	Fördröjning (sek)			
	30	60	90	120
2	1.57	1.34	1.58	1.49
3	1.35	1.32	1.30	1.39
4		1.16	1.09	1.10
5			1.05	1.07

Resultaten från residualtest och jämförelse mellan utsignal från modell och experiment överensstämmer i stort med de från försök 1. Residualerna är minst vid 90 sek fördröjning men ökar vid större fördröjningar. Endast i några fall var alla egenvärden positiva.

Slutligen undersöktes försök 4:

TABELL 4. Förlustfunktionen försök 4 då trend $298.945 + 0.0063x$ borttagits från utsignalen.

Ordning	Fördröjning (sek)			
	30	60	90	120
2	3.08	2.93	2.94	3.21
3	3.21	2.90	2.90	3.04
4	2.94	2.75	2.85	
5	2.59	2.70	2.64	

Resultaten skiljer sig här gentemot de två andra, då residualerna såväl som förlustfunktionen har sina minsta värden vid 60 sek fördröjning och ökar sedan markant vid 120 sek fördröjning. Även modell-experimentjämförelsen tyder på 60 eller 90 sek fördröjning.

Sammanfattningsvis kan konstateras att försök 1 och 2 tyder på 90 sek fördröjning, försök 4 på 60 sek eller 90 sek fördröjning.

Den senare väljes då som transportfördröjning vid fortsatta identifieringar. Dessa avslutas först då två på varandra följande identifieringar ger likartade resultat. Koefficienternas rötter anges i det samplade fallet och för \underline{A} -polynomen även i det kontinuerliga fallet, då vi härur kan räkna ut egenfrekvenser och relativ dämpning.

Ordningstal $n = 2$.

Då ytterligare iterationer inte medförde några förändringar gav försöken följande resultat:

TABELL 5. Polynomkoefficienter, rötter till polynomen, brusets skattade standardavvikelse λ , förlustfunktion V , egenfrekvenser w_0 och relativ dämpning ξ för 2:a ordningens system, 90 sek fördröjning. Det kontinuerliga systemets poler anges inom ().

		Försök 1	Försök 2	Försök 3
Polynom- koefficienter	a1	$-1.8053 \pm 3 \cdot 10^{-2}$	$-1.8308 \pm 5 \cdot 10^{-2}$	$-1.8269 \pm 3 \cdot 10^{-2}$
	a2	$0.8254 \pm 3 \cdot 10^{-2}$	$0.86015 \pm 5 \cdot 10^{-2}$	$0.8372 \pm 3 \cdot 10^{-2}$
	b1	$-1.1784 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-3}$	$6.9944 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-3}$	$6.9944 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-3}$
	b2	$4.3539 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-3}$	$1.6817 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-3}$	$3.2888 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-3}$
	c1	$-1.3057 \pm 7 \cdot 10^{-2}$	-1.3292 ± 0.10	$-1.4007 \pm 8 \cdot 10^{-2}$
	c2	$0.4907 \pm 7 \cdot 10^{-2}$	0.5642 ± 0.10	$0.5365 \pm 7 \cdot 10^{-2}$
Rötter	A	$0.9029 \pm i 0.1009$ $(-0.0959 \pm i 0.1113)$	$0.9154 \pm i 0.1490$ $(-0.0753 \pm i 0.1614)$	$0.9134 \pm i 0.0528$ $(-0.0889 \pm i 0.0577)$
	B	-3.6949	3.2442	-47.0202
	C	$0.6528 \pm i 0.2539$	$0.6646 \pm i 0.3500$	$0.7003 \pm i 0.2145$
	λ	0.2015	0.17481	0.1988
	V	4.2025	1.3293	2.9429
	w_0	0.1469	0.1781	0.1060
	ξ	0.65	0.42	0.83

Observera att då vi ej har direktverkan mellan in- och utsignal, kommer B-polynomet att ha en rot mindre än A- och C-polynomen.

Vid dessa iterationer var för samtliga försök förlustfunktionens gradient mycket liten (mindre än 10^{-4}) och samtliga egenvärden var positiva. Framför allt A- men även C-polynomen visar god överensstämmelse, medan B-polynomen varierar kraftigt. Detta framgår av felgränsernas storlek. Om börvärdesändringarna haft större amplitud, skulle vi sannolikt fått bättre överensstämmelse och en säkrare modell. I figurerna 13-15 visas stegsvaren på 10°C insignal. Enligt diagram VII borde man vänta sig en amplitud på $2.5-3^{\circ}\text{C}$, en ganska kraftig, utdragen översläng och en stigtid (= tiden för stegsvaret att gå från 0.1 till 0.9 av stationärvärdet) på ca 5 min. Tiden för stationaritet kan uppskattas till mellan 16 och 20 min. Alla försöken visar stora avvikelser från detta, särskilt försök 2. De inbördes avvikelserna beror främst på stora skillnader i B-polynomen. Med tillgång till parameter-estimatens kovariansmatris testades modellens noggrannhet och visar, ej oväntat, i samtliga fall stor osäkerhet bland B-koefficienterna. A- och C-polynomens koefficienter är mera pålitliga. Figurerna 16-18 ger utsignaler från modell och experiment.

Ordningstal $n = 3$.

Som framgår av Tabell 6 skiljer sig försök 1 kraftigt från de två andra och modellens osäkerhet är stor. Förutom den dubbel-pol, som ger en egenfrekvens på ca 0.15 har det samplade systemet en rot på negativa, reella axeln (försök 2 och 4). Detta har ingen fysikalisk motsvarighet och systemordningen 3 kan utslutas. Lägg dock märke till att de komplexkonjugerade rötterna till A- och C-polynomen är gemensamma för ordningarna. En egenfrekvens kring 0.15 är trolig.

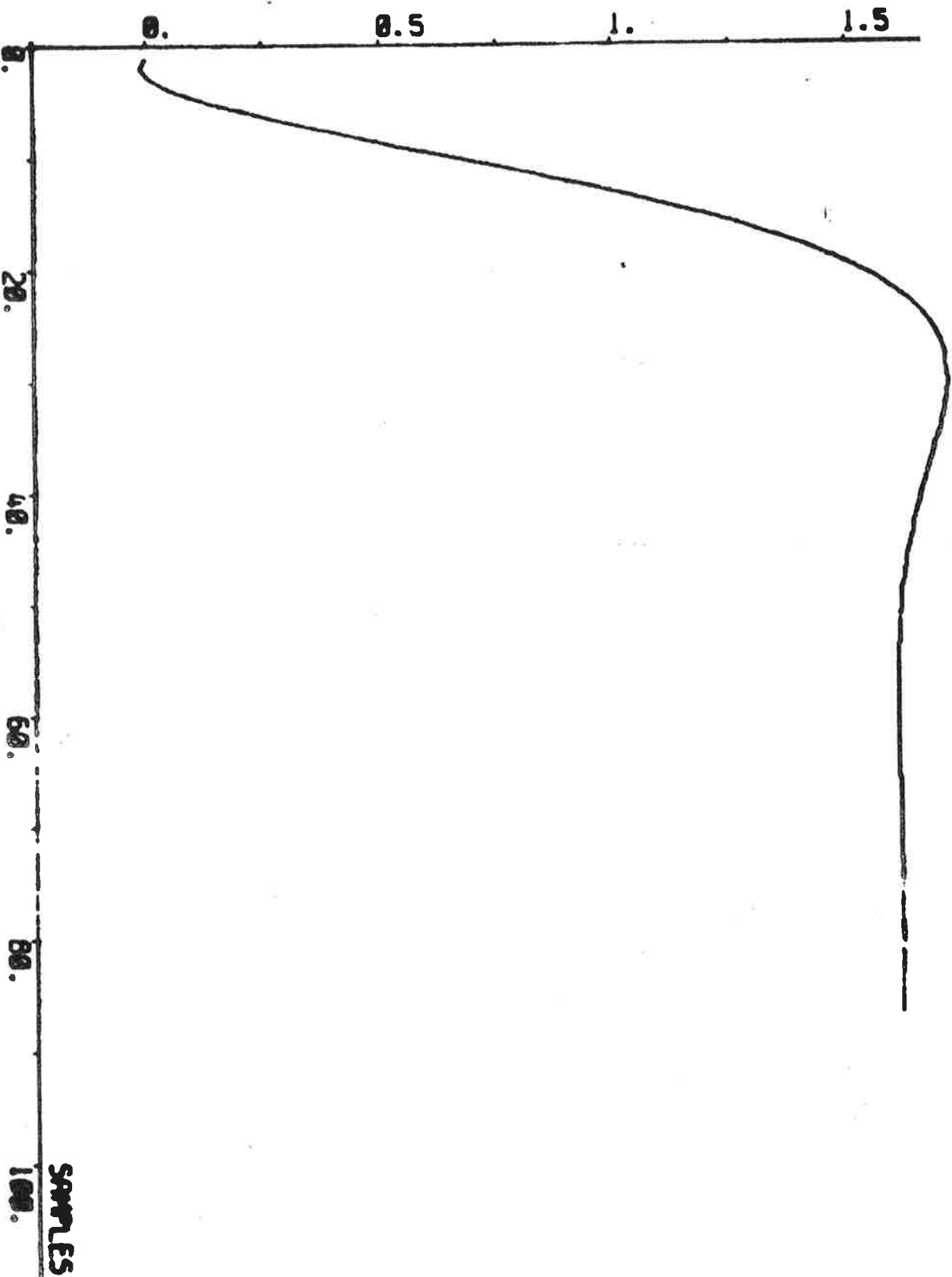
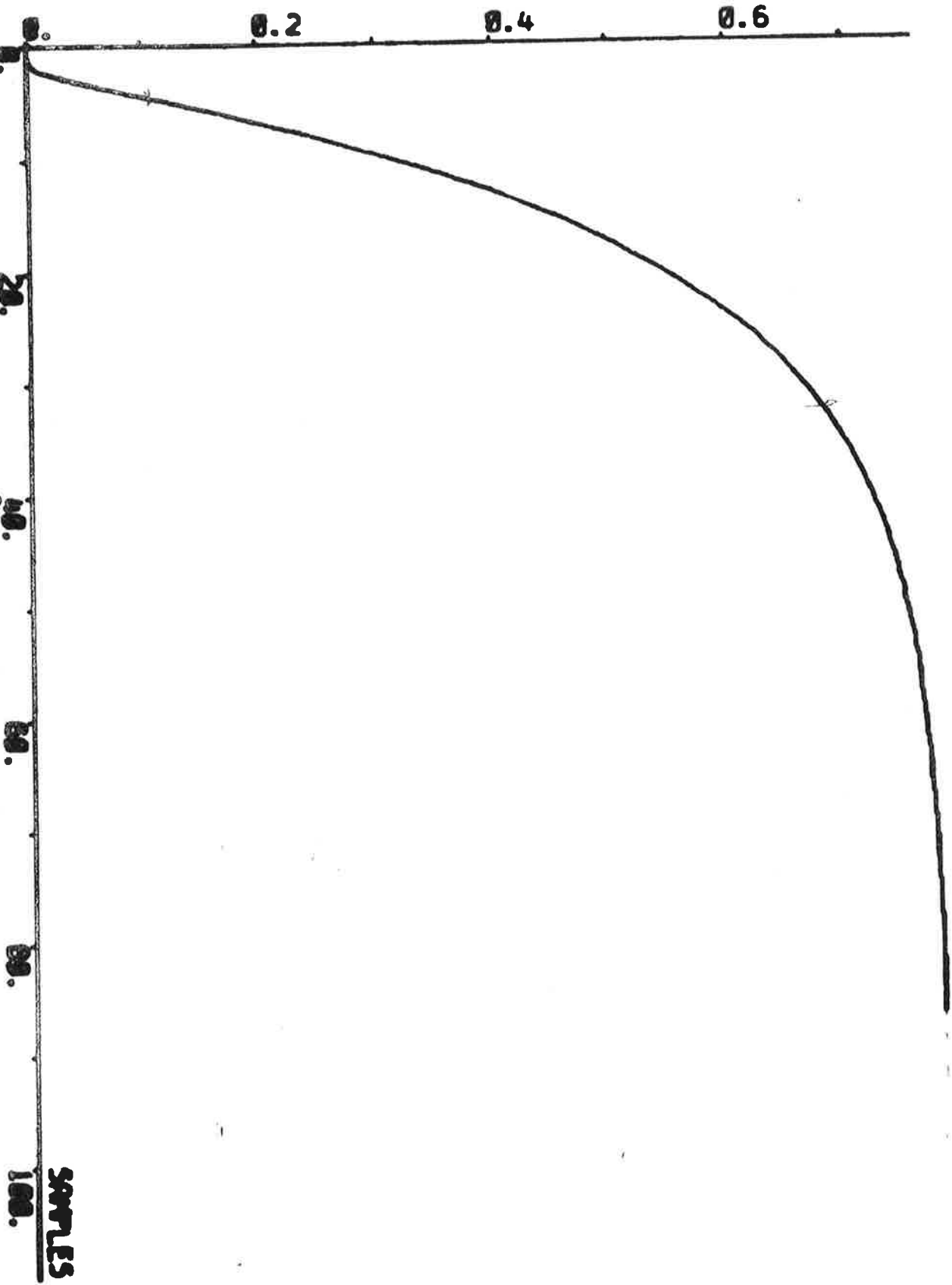


Fig 13: Stegsvär, insignal 10 °C vid 90 sek transpottfördröjning 2:a ordn.system försök 1

Fig. 14: Stegsvär, insignal 10. °C vid 90 sek transportfördröjning 2:a ordn. system försök 2



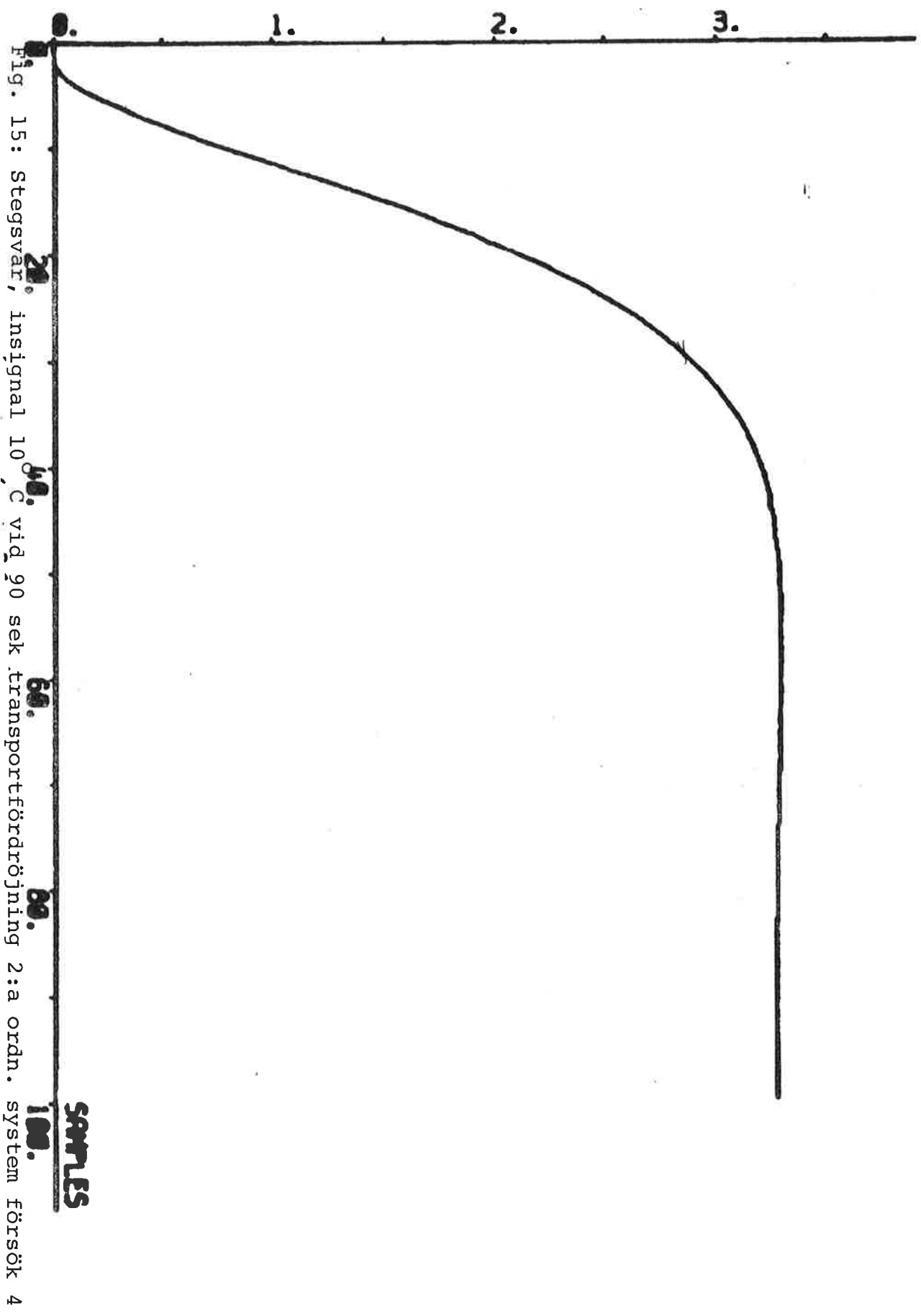


Fig. 15: Stegsvär, insignal 10^6 C vid 90 sek transportfördröjning 2:a ordn. system försök 4

TABELL 6. Polynomkoefficienter, rötter till polynom, brusets skattade standardavvikelse λ , förlustfunktion V , egenfrekvenser w_0 och relativ dämpning ξ för 3:e ordningens system, 90 sek fördröjning. Det kontinuerliga systemets poler anges inom ().

		Försök 1	Försök 2	Försök 3
Polynom- koefficienter	a1	-1.7794 \pm 0.85	-0.80724 \pm 6 \cdot 10 ⁻²	-0.8283 \pm 4 \cdot 10 ⁻²
	a2	0.8228 \pm 1.55	-1.0111 \pm 4 \cdot 10 ⁻²	-0.9782 \pm 3 \cdot 10 ⁻²
	a3	-2.2654 \cdot 10 ⁻² \pm 0.7	0.8716 \pm 6 \cdot 10 ⁻²	0.8273 \pm 3 \cdot 10 ⁻²
	b1	2.2022 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻³	2.2697 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻²	8.7720 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 2 \cdot 10 ⁻³
	b2	-3.0584 \cdot 10 ⁻³ \pm 5 \cdot 10 ⁻³	-2.9204 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 1 \cdot 10 ⁻²	1.6817 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻³
	b3	4.9566 \cdot 10 ⁻³ \pm 5 \cdot 10 ⁻³	2.9816 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻²	4.3002 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻³
	c1	-1.2952 \pm 0.83	-0.2728 \pm 0.12	-0.3671 \pm 9 \cdot 10 ⁻²
	c2	0.5335 \pm 1.00	-0.7407 \pm 0.06	-0.8583 \pm 6 \cdot 10 ⁻²
	c3	-3.2753 \cdot 10 ⁻² \pm 0.32	0.4734 \pm 0.12	0.5089 \pm 8 \cdot 10 ⁻²
Rötter	A	0.8750 \pm i 0.0758 (-0.1298 \pm i 0.0864) 0.0293 (-3.5302)	0.9139 \pm i 0.1376 (-0.0788 \pm i 0.1494) -1.0205 (-)	0.9110 \pm i 0.0501 (-0.0917 \pm i 0.0549) -0.9938 (-)
	B	0.6943 \pm i 1.3299	0.0643 \pm i 1.1443	-0.9586 \pm i 1.9958
	C	0.6106 \pm i 0.2651 0.0740	0.6257 \pm i 0.3069 -0.9786	0.6836 \pm i 0.2040 -1.0000
	λ	0.1983	0.1689	0.1898
	V	4.0724	1.2415	2.6841
	w_0	0.1559	0.1689	0.1069
ξ	0.83	0.46	0.82	

Ordningstal $n = 4$.

TABELL 7. Polynomkoefficienter, rötter till polynom, brusets skattade standardavvikelse λ , förlustfunktion V , egenfrekvenser w_0 och relativ dämpning ξ för 4:e ordningens system, 90 sek fördröjning. Det kontinuerliga systemets poler anges inom ().

		Försök 1	Försök 2	Försök 3
Polynom- koefficienter	a1	-2.0855 \pm 0.31	-1.2141	-0.9256
	a2	1.7476 \pm 0.72	0.4630	-0.2341
	a3	-0.9600 \pm 0.68	-0.7270	-0.2718
	a4	0.31201 \pm 0.25	0.5437	0.4578
	b1	1.1315 \cdot 10 ⁻³ \pm 2 \cdot 10 ⁻³	-1.3250 \cdot 10 ⁻³	1.1293 \cdot 10 ⁻³
	b2	2.4269 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 4 \cdot 10 ⁻³	1.0718 \cdot 10 ⁻²	2.2273 \cdot 10 ⁻³
	b3	2.9389 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5 \cdot 10 ⁻³	-1.1428 \cdot 10 ⁻²	2.0411 \cdot 10 ⁻³
	b4	2.5644 \cdot 10 ⁻³ \pm 3 \cdot 10 ⁻³	9.0731 \cdot 10 ⁻³	3.4100 \cdot 10 ⁻³
	c1	-1.6102 \pm 0.30	-0.6337	-0.4795
	c2	1.4108 \pm 0.53	0.5790	-0.1223
	c3	-0.8983 \pm 0.42	-0.9082	-0.4573
	c4	0.3387 \pm 0.13	0.6391	0.4210
Rötter	A	0.8832 \pm i 0.0885 (-0.1192 \pm i 0.0999) -0.1596 \pm i 0.6087 (-0.4632 \pm i 1.3144)	0.8925 \pm i 0.1332 (-0.1027 \pm i 0.1482) -0.2854 \pm i 0.7657 (-0.2019 \pm i 1.9276)	0.9075 \pm i 0.0469 (-0.0957 \pm i 0.0516) -0.4447 \pm i 0.5972 (-0.2949 \pm i 2.2109)
	B	0.5525 \pm i 1.1885 -1.3195	0.5465 \pm i 0.8268 6.8171	-0.0514 \pm i 1.2699 -1.8695
	C	0.7200 \pm i 0.3101 0.0851 \pm i 0.7375	0.6969 \pm i 0.3914 -0.3863 \pm i 0.9250	0.7288 \pm i 0.2469 -0.4890 \pm i 0.6870
	λ	0.19585	0.15813	0.19569
	V	3.9699	1.0877	2.8531
	w_0	0.1555, 1.3936	0.1803, 1.9381	0.1087, 2.2305
ξ	0.77, 0.33	0.57, 0.10	0.88, 0.13	

Vid 4:e ordningens system ökar svårigheten att nå konvergens. Försök 4 har ett negativt egenvärde och försök 2 visar en mycket stor gradient. Osäkerheten är så stor att felgränser ej kunnat beräknas. I det fall (försök 2) kovariansmatrisen kunnat beräknas, har modellen testats och visar en ganska stor osäkerhet bland alla tre polynomen. De komplexkonjugerade rötterna till A- och C-polynomen från $n=2$ och $n=3$ finns kvar, medan de som tillkommit, skiljer sig åt. En egenfrekvens på ca 2.0 svarande mot den andra dubbelroten till A-polynomet är möjlig. Undantaget B-polynomet, vilket som alltid visar störst variation, finns en viss samstämmighet mellan försök 2 och 4. Stegsvaren för försök 1 resp 2 (Figurerna 19 resp 20) har fått större amplitud och närmar sig den från diagram VII väntade, medan överslängen försvunnit resp tillkommit. Stigtiderna är tillfredsställande, lika så tiderna för stationaritet. Stegsvaret för försök 4 har ej förändrats och representeras av Figur 15. Jämförelsen mellan utsignaler från modell och experiment är också oförändrade sedan 2:a ordningens system (Figurerna 16-18).

Ordningstalet $n = 5$.

Svårigheten att nå konvergens blir ännu mera påtaglig vid 5:e ordningens system. Identifieringen utfördes för försök 2. Samtliga dubbelrötter från A- och C-polynomen samt dubbelroten från B-polynomet vid $n=4$ återkommer och egenfrekvenserna överensstämmer någorlunda. Med förlustfunktionen $V = 1.0498$ utfördes testet enligt sidan 12 mellan $n=4$ och $n=5$, vilken gav $\tau = 2.85$. Detta är tillräckligt litet för att $n=4$ skall accepteras.

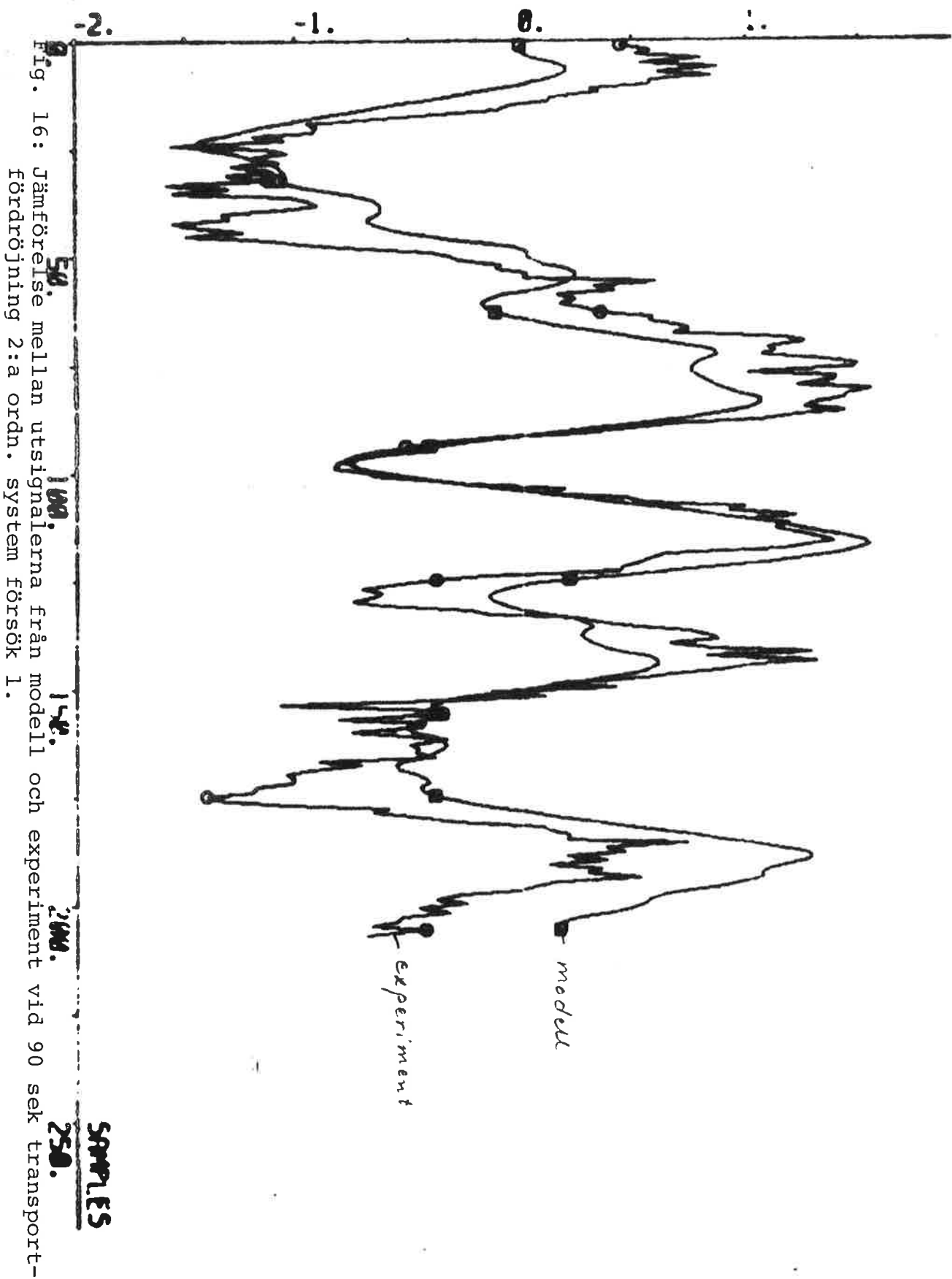


Fig. 16: Jämförelse mellan utsignalerna från modell 1 och experiment vid 90 sek transport-fördrojning 2:a ordn. system försök 1.

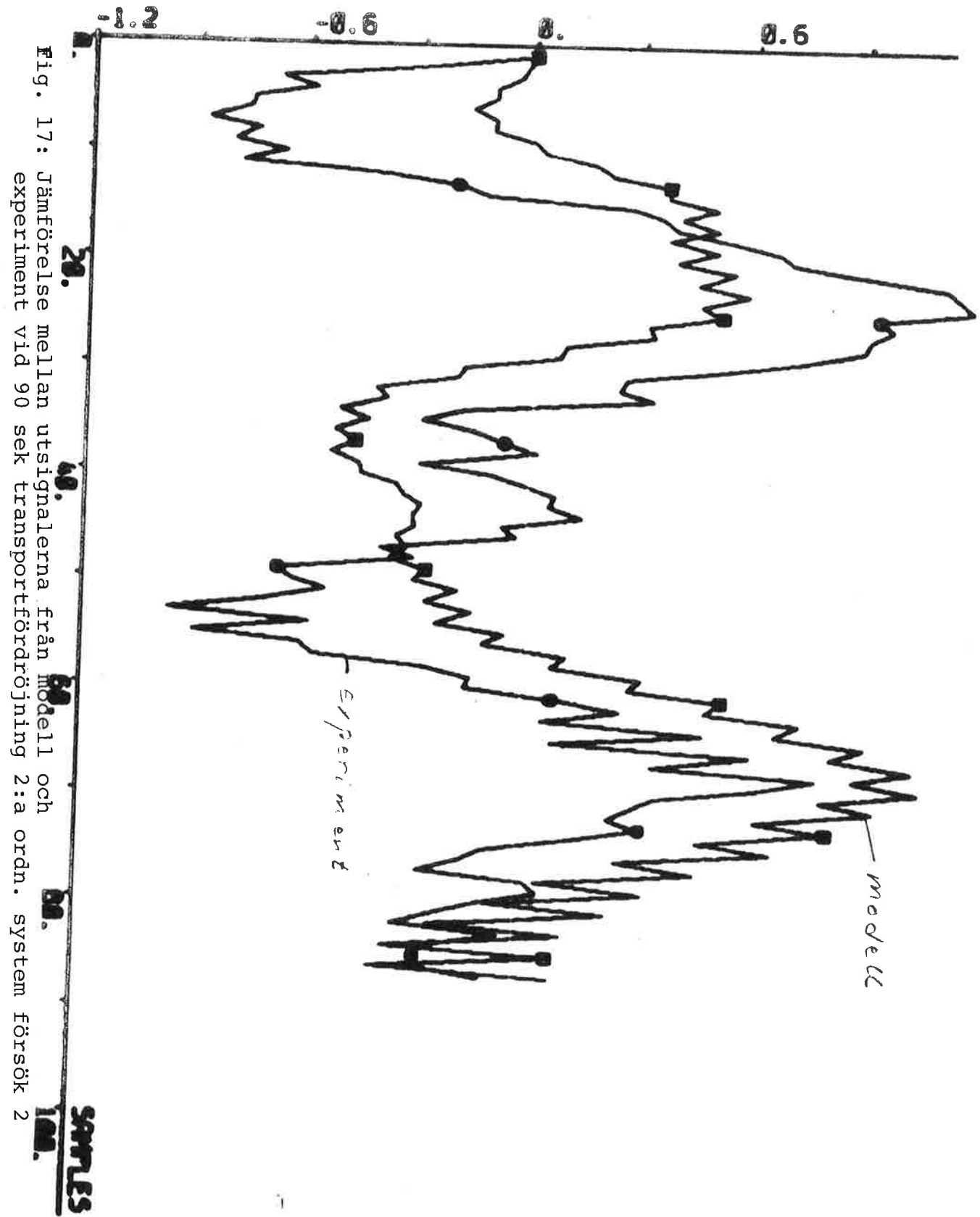


Fig. 17: Jämförelse mellan utsignalerna från modell och experiment vid 90 sek transportfördröjning 2:a ordn. system försök 2

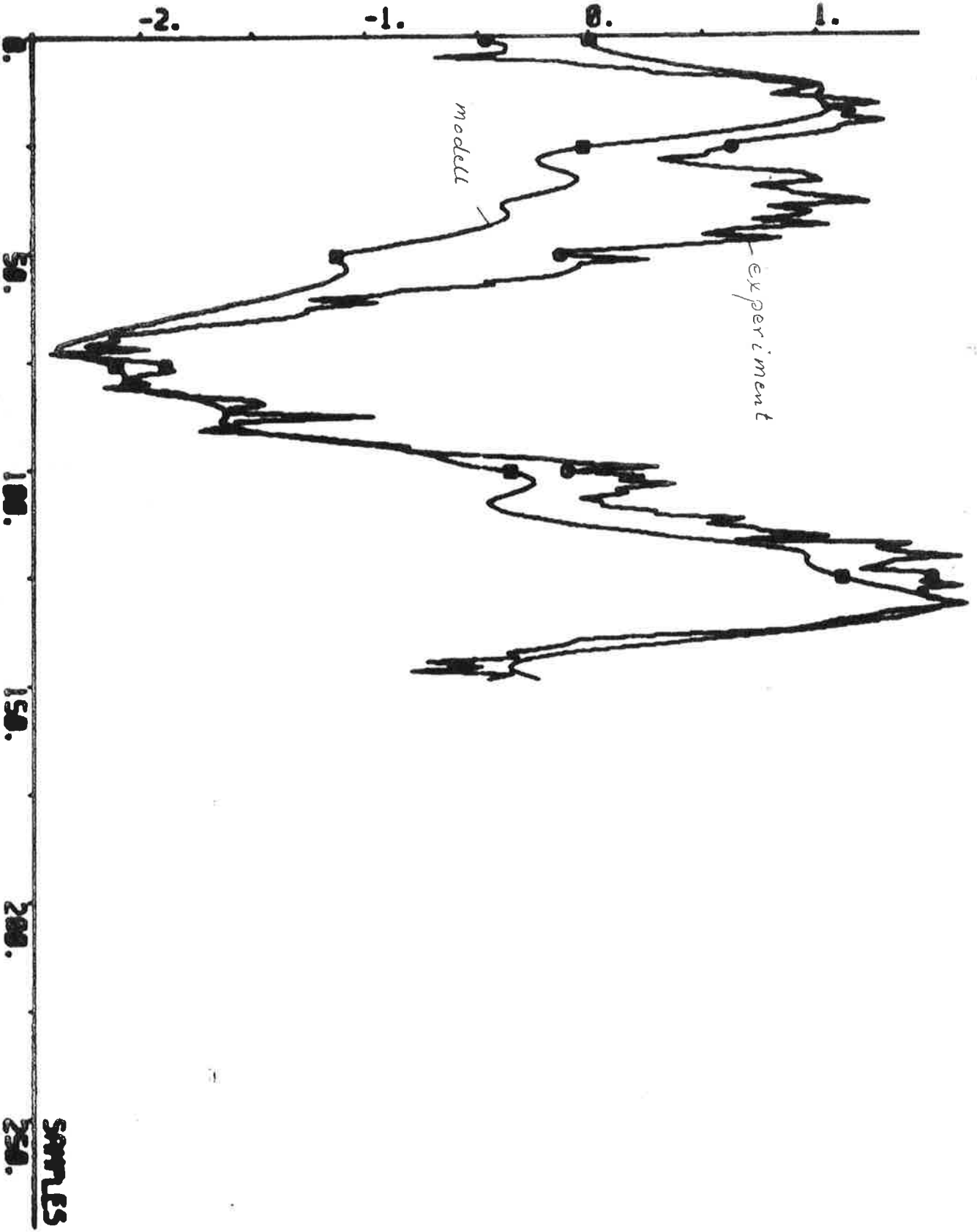


Fig. 18: Jämförelse mellan utsignalerna från modell och experiment vid 90 sek transportfördröjning 2:a ordn. system försök 4

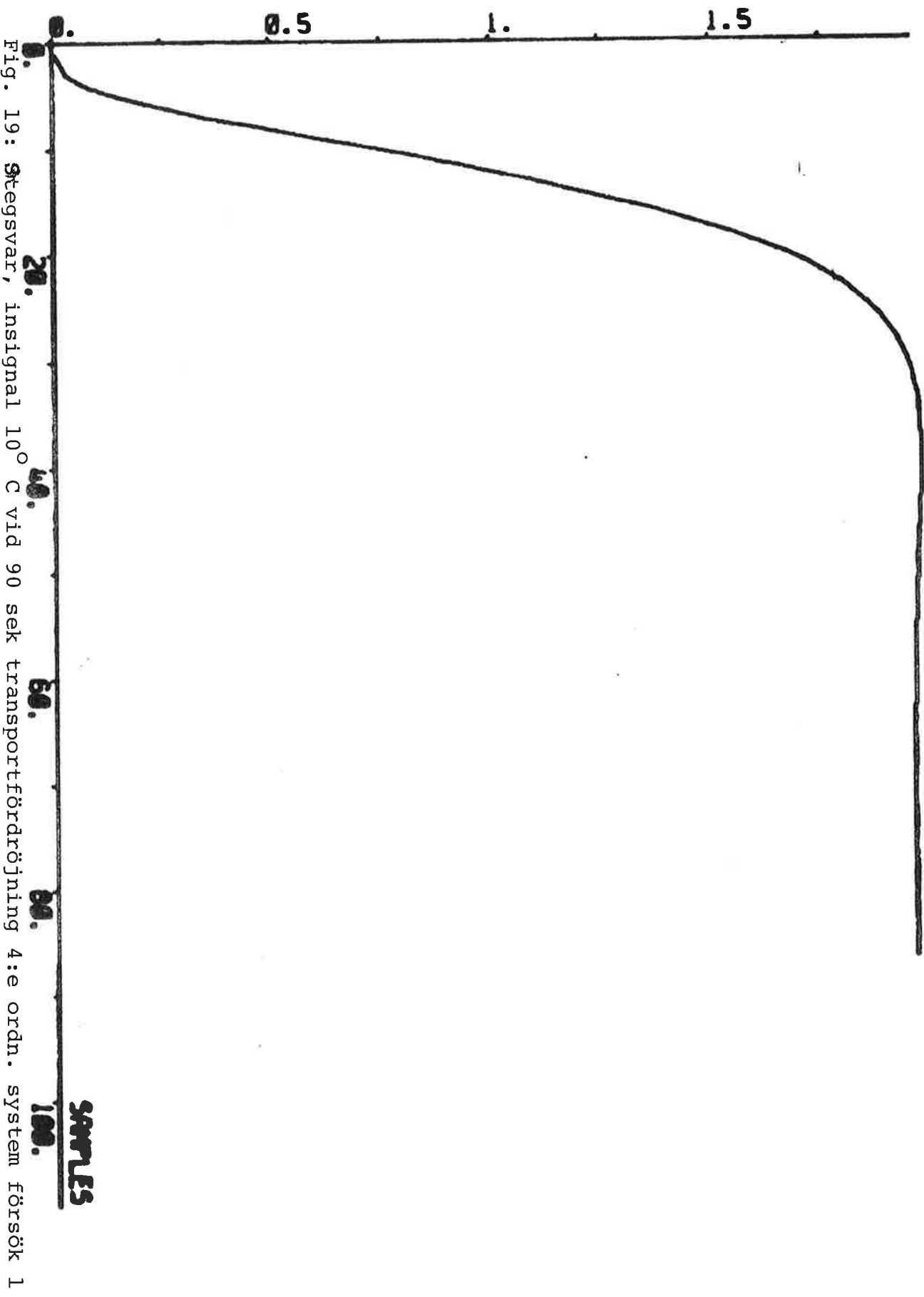
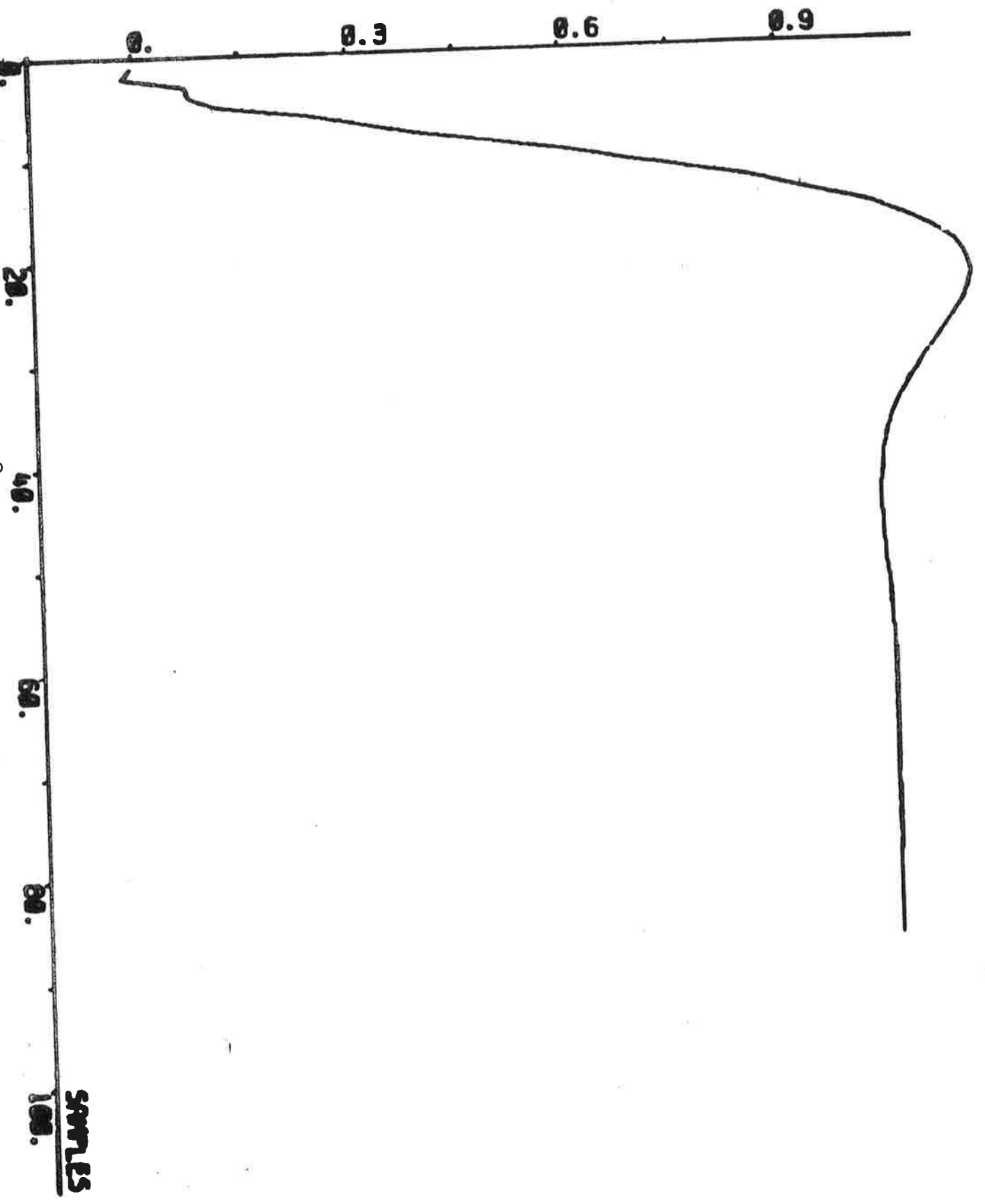


Fig. 19: Stegsvär, insignal 10° C vid 90 sek transportfördröjning 4:e ordn. system försök 1

Fig. 20: Stegsvär, insignal 10° C vid 90 sek transportfördröjning 4:e ordn. system försök 2



SAMMANFATTNING

En förundersökning visar att av de fem, längs cylindern symmetriskt utplacerade värmarna, är det den närmast extrudermynningen som skall varieras för att mest kraftfullt kunna påverka plastens uttemperatur. En ändring av börvärdet 10°C ger en plasttemperaturförändring på ca 2.5°C och är genomförd på 15-20 min. Transportfördröjningen uppskattas till 90 sek. Systemet beskrivs nöjaktigt med en 2:a ordningens modell. Det kontinuerliga systemet har en egenfrekvens på ca 0.15 och en dämpning på ca 0.6.

För att få en modell, som bättre överensstämmer med systemet, måste ordningstalet ökas till 4. Osäkerheten blir dock större. Här tillkommer en egenfrekvens på ca 2.0 och en dämpning på ca 0.15.

Det är vanskligt att ge en säker modell då framför allt insignalpolynomen varierar kraftigt mellan identifieringarna. Orsaken till detta är att börvärdesändringarna varit för små och givit alltför små uttemperaturvariationer.

REFERENSER

- (1) Gustavsson, Lennart, Extruderteori, Institutionen för konstruktionsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1971.
- (2) Gregory, R.B. och Bunte, W.S., New Technics in Extrusion Coating Screw Design,
- (3) Söderström, T., Kompendium i processidentifiering, Teknikum, Uppsala universitet, 1974.
- (4) Åström, K.J., Reglerteknik, Stokastiska system, Lunds Tekniska Högskola, 1971.
- (5) Gustavsson, Ivar, Synpunkter på problem vid praktiska identifieringsexperiment - speciellt val av insignal, Lunds Tekniska Högskola, 1970.
- (6) Wieslander, J, IDPAC, Users guide, Report 7605, Dept of Automatic Control, Lund Institute of Technology, April 1976.