

REELTIDSIDENTIFIERING
PÅ HALDEN-DATA

Lars Lindberg

RE - 120 november 1972
Inst. för reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

Reelltidsidentifiering på Halden-data

Lars Lindberg

Sammanfattning

En reelltidsidentifiering med hjälp av Kalman-filter har i detta examensarbete, gjorts på data från Haldenreaktorn, där ett antal experiment har utförts.

Som insignaler har signaler till styrstavar och en ångventil använts, och som utsignaler trycken i respektive primär, sekundär och tertiärkretsen. Slutligen görs en jämförelse med resultat från en maximum-likelihood identifiering.

Ansvarig handledare: Björn Wittenmark

Real Time Identification on Halden Data

Lars Lindberg

Abstract

A real time identification has in this work been made by the use of a Kalman filter on data from the Halden reactor, where a number of experiments have been performed. As inputs are rods and a steam valve used and as outputs the pressures in respectively the primary, secondary and tertiary circuit. Finally a comparison with results from a maximum likelihood identification is made.

<u>Innehållsförteckning</u>		sid.
1.	Inledning	2
2.	Problemformulering	3
3.	Algoritmen (Kalman-filter)	5
4.	Simulerat exempel	8
4.1	Tidskonstanta parametrar	8
4.2	Tidsvariabla parametrar	10
4.3	Sammanfattning	11
5.	Inverkan av mätbrus	20
6.	Haldenreaktorn	24
6.1	Kort beskrivning av processen	24
6.2	Insignalen	26
6.3	Mätserierna	26
7.	Identifiering	32
7.1	Identifiering på RUN 10	32
7.2	Identifiering på RUN 8	38
8.	Jämförelse med maximum-likelihood identifiering	43
9.	Resultatsammanfattning	45
10.	Referenser	47
Appendix A Program för läsning från banden		
Appendix B Identifieringsprogram		
Appendix C Övriga program		

1. Inledning

Kalman-filter har i detta examensarbete använts, för att utföra reelltidsidentifieringar på data från två experiment från Haldenreaktorn. Det ena experimentet väntades ge en modell med tidskonstanta parametrar, medan parametrarna i modellen för det andra experimentet förväntades vara tidsvariabla. Den använda modellen har två insignaler och tre utsignaler och i examensarbetet presenteras också en reelltidsestimator, som kan klara flera in- och utsignaler.

I avsnitt 2 ges en närmare av den antagna modellen, medan avsnitt 3 presenterar den använda algoritmen. För att testa denna algoritms användbarhet har ett antal simuleringar utförts dels med tidskonstanta och dels med tidsvariabla parametrar. En redogörelse för detta finns i avsnitt 4. En förutsättning för att Kalmanfiltret skall konvergera mot rätt värden är, att bruset är vitt. I avsnitt 5 visas resultatet av några simuleringar där detta ej gäller. I avsnitt 6 ges sedan en kortfattad beskrivning av reaktorn och experimenten, och resultaten av identifieringarna ges i avsnitt 7. Det förefaller att vara så att båda experimenten ger modeller med tidskonstanta parametrar, tvärtemot vad som antagits. Man kan dock inte utesluta att någon eller några parametrar är tidsberoende. I avsnitt 8 slutligen görs en jämförelse med resultaten från en maximum-likelihood identifiering.

2. Problemformulering

För att undersöka hur dynamiken hos en process varierar t.ex. med belastningen, är det önskvärt att kunna identifiera processens parametrar i reell tid. Reelltidsidentifiering behandlas t.ex. i ref. [4],[5]. Avsikten med detta examensarbete är, att utveckla en metod, som kan vara lämplig att använda på data, som erhållits från OECD:s forskningsreaktor i Halden. På denna speciella reaktor är det möjligt, att noggrant mäta vissa intressanta processvariabler. Detta gör, att man kan anse, att vissa signaler kan mätas utan brus. Detta skall utnyttjas, för att göra en reelltidsestimator, som kan klara flera insignaler och flera utsignaler.

Antag, att systemet, genom lämpligt införda tillståndsvariabler, kan skrivas på följande form:

$$\begin{cases} x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t) + v(t) \\ y(t) = x(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

där $v(t)$ är en sekvens av vitt brus med medelvärde noll, och kovariansfunktionen $R_1 = E v(t)v(t)^T$.

Om man antar, att $y(t)$ är de intressanta signalerna, kan tillståndsvariablerna $x(t)$ elimineras ty:

$$x(t) = y(t) - Du(t)$$

Detta medför att (2.1) kan skrivas som:

$$y(t+1) = \phi y(t) + Du(t+1) + \underbrace{(\Gamma - \phi D)}_{\Gamma'} u(t) + v(t) \quad (2.2)$$

Den främsta förutsättning, som här är gjord, är att samtliga tillståndsvariabler kan lösas ut som funktion av in- och ut-signalerna.

Om man ej kan mäta utsignalerna exakt, utan med ett brus $e(t)$ dvs:

$$y(t) = x(t) + Du(t) + e(t)$$

innebär detta att (2.2) istället blir:

$$y(t+1) = \phi y(t) + Du(t+1) + \Gamma u(t) + e(t+1) + v(t) - \phi e(t) \quad (2.2')$$

dvs bruset blir ej längre vitt. Konsekvenserna av detta diskuteras i avsnitt 5.

Identifieringsproblemet består nu i att med hjälp av givna in- utsignalpar bestämma elementen i matriserna ϕ, D och Γ . Om systemet har p insignaler och q utsignaler innebär det, att $n = q^2 + 2pq$ parametrar måste identifieras. Även om av fysikaliska skäl den kontinuerliga motsvarigheten till (2.1) innehåller många element, som är lika med noll, så kommer matriserna ϕ och Γ i de flesta fall, att innehålla element, som samtliga är skilda från noll. Däremot kan man av fysikaliska skäl minska antalet parametrar, som skall identifieras, genom att matrisen D kan innehålla kända element.

Identifieringen kommer att utföras radvis i (2.2) med hjälp av Kalman-filter, vilket beskrives i nästa avsnitt.

3. Algoritmen (Kalmanfiltrering)

Betrakta följande modell:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + b_2 u(t-2) + \dots + b_n u(t-n) + e(t) \quad (3.1)$$

där $e(t)$ är vitt normalfördelat brus med medelvärde noll och kovariansfunktionen

$$R_2 = E e(t)e(t)^T$$

Omskrivning av (3.1) ger:

$$y(t) = \underbrace{(-y(t-1) \quad u(t-1) \quad -y(t-2) \quad \dots \quad -y(t-n) \quad u(t-n))}_{\varphi(t-1)} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ \vdots \\ a_n \\ b_n \end{bmatrix} + e(t) \quad (3.2)$$

$\theta(t)$

$$y(t) = \varphi(t-1) \theta(t) + e(t) \quad (3.3)$$

I denna ekvation innehåller φ gamla värden på in- och utsignalerna medan θ innehåller de okända parametrarna. θ kan vara tidsberoende. Antag, att tidsberoendet kan beskrivas av

$$\theta(t+1) = \theta(t) + v(t) \quad (3.4)$$

där $v(t)$ är vitt normalfördelat brus med medelvärde noll och kovariansfunktionen

$$R_1 = E v(t)v(t)^T$$

Ekvationerna (3.3) och (3.4) bestämmer nu ett linjärt, tidsvariabelt dynamiskt system med θ som tillståndsvektor.

Ett Kalmanfilter kan nu användas för att estimeras θ , som alltså innehåller de okända parametrarna.

Man får:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t)(y(t) - \varphi(t-1)\hat{\theta}(t)) \\ K(t) = P(t)\varphi(t-1)^T(R_2 + \varphi(t-1)P(t)\varphi(t-1)^T)^{-1} \\ P(t+1) = P(t) + R_1 - K(t)(R_2 + \varphi(t-1)P(t)\varphi(t-1)^T)K(t)^T \end{cases} \quad (3.5)$$

Subrutinen KALID (förf. av Johan Wieslander), som användes vid identifieringen, använder denna algoritm. Därvid är P-ekvationen skalad så att $R_2 = 1$, vilket innebär, att R_1 , dvs kovariansmatrisen för parameterbruset, anges med R_2 som enhet.

Då R_1 är okänd måste man ansätta en lämplig matris. Det är oftast bäst att välja $R_1 = r \cdot I$, där ett typiskt värde på r är 0.1 ... 0.0001. Ett litet värde ger mindre känslighet för mätbrus, medan möjligheterna att följa tidsvariabla parametrar försämras.

Betrakta nu:

$$\begin{bmatrix} y_1(t+1) \\ y_2(t+1) \\ y_3(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t+1) \\ u_2(t+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \\ \gamma_{31} & \gamma_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + v(t) \quad (3.6)$$

vilket är den i föregående avsnitt presenterade modellen.

För y_1 fås:

$$\begin{aligned} y_1(t+1) = & \varphi_{11}y_1(t) + \varphi_{12}y_2(t) + \varphi_{13}y_3(t) + d_{11}u_1(t+1) + d_{12}u_2(t+1) + \\ & + \gamma_{11}u_1(t) + \gamma_{12}u_2(t) + v_1(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

eller efter omskrivning:

$$y_1(t+1) = (y_1(t) \ y_2(t) \ y_3(t) \ u_1(t+1) \ u_2(t+1) \ u_1(t) \ u_2(t)) \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{12} \\ \varphi_{13} \\ d_{11} \\ d_{12} \\ \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} + v_1(t) \quad (3.8)$$

Helt analoga ekvationer erhålles för y_2 och y_3 .

En jämförelse visar, att ekvation (3.8) har precis samma struktur som ekvation (3.3), och man kan alltså använda Kalmanfiltret (3.5) för att identifiera parametrarna i (3.6), varvid identifieringen utföres radvis.

En av förutsättningarna, som måste göras för att Kalman-filtret skall konvergera mot rätt värde, är att bruset $v(t)$ är vitt dvs $E v(t+\tau)v(t)^T = 0; \tau \neq 0$.

Om detta ej gäller kommer estimaten, att konvergera mot fel värden. Detta brukar betecknas som bias. I (2.2) är bruset vitt, eftersom utsignalerna $y(t)$ kunde mätas utan brus. Däremot kan man ej använda ekvation (2.2') ty då gäller:

$$\begin{aligned} E(e(t+2) - \phi e(t+1) + v(t+1))(e(t+1) - \phi e(t) + v(t))^T &= \\ = - \phi E e(t+1)e(t+1)^T \end{aligned}$$

Inverkan av mätbrus studeras i avsnitt 5.

4. Simulerat exempel

För att undersöka metodens användbarhet har den testats på ett antal simulerade exempel, dels med tidskonstanta och dels med tidsvariabla parametrar.

4.1 Tidskonstanta parametrar.

Den simulerade modellen med tidsinvarianta parametrar var:

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 \\ -a_2 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} u(t) + v(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_1 \\ d_2 & 0 \end{bmatrix} u(t)$$

eller om $x(t)$ elimineras:

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 \\ -a_2 & 0 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_1 \\ d_2 & 0 \end{bmatrix} u(t+1) + \begin{bmatrix} b_1 - d_2 & a_1 d_1 \\ 0 & b_2 + a_2 d_1 \end{bmatrix} u(t) + v(t)$$

Följande värden antogs: $a_1 = -1.5$ $b_1 = 1$ $d_1 = 0.5$

$a_2 = 0.7$ $b_2 = 2$ $d_2 = 1$

vilket ger:

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 1.5 & 1 \\ -0.7 & 0 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} u(t+1) + \begin{bmatrix} 0 & -0.75 \\ 0 & 2.35 \end{bmatrix} u(t) + v(t)$$

En subrutin (MODEL) konstruerades för att generera utsignalerna $y(t)$ enligt denna ekvation. Som insignaler användes s.k. PRBS-signalerna, med amplituden 1 enhet. Perioderna var 7 respektive 127 samplingsintervall för de båda insignalerna. Bruset $v(t)$ erhöles genom subrutinen NODI, där vitt normalfördelat brus med medelvärde noll och godtycklig standardavvikelse erhålles. För identifieringen användes subrutinen KALID. Identifieringen utfördes för λ -värdena 0.1, 0.5, 1.0. Värdet på matrisen R_1 i KALID sattes till $10^{-6} \cdot I$.

Nedanstående tabell ger en sammanfattning av resultaten från simuleringarna.

λ	0.1	0.5	1.0	Korreakta värden
ϕ_{11}	1.50	1.50	1.49	1.50
ϕ_{12}	1.00	1.00	0.98	1.00
ϕ_{21}	-0.70	-0.72	-0.73	-0.70
ϕ_{22}	0.00	-0.02	-0.04	0.00
d_{11}	0.01	0.05	0.10	0.00
d_{12}	0.49	0.47	0.43	0.50
d_{21}	1.00	1.02	1.04	1.00
d_{22}	0.00	0.00	0.02	0.00
γ_{11}	0.01	0.05	0.12	0.00
γ_{12}	-0.76	-0.80	-0.82	-0.75
γ_{21}	0.00	0.02	0.04	0.00
γ_{22}	2.35	2.37	2.39	2.35

Resultaten ovan har tagits efter 500 samplingspunkter.

Av simuleringarna framgår, att acceptabla resultat erhålles även vid så kraftigt brus, som i det sista fallet. En beräkning av utsignalernas varians, då $u(t)$ är identiskt noll ger:

$$E y_1^2 = 16.7\lambda^2$$

$$E y_2^2 = 9.2\lambda^2$$

Utsignalernas varians då $u(t)$ är vitt brus blir

$$E y^2 = \begin{bmatrix} 9.4 & 36.1 \\ 5.3 & 21.2 \end{bmatrix}$$

dvs signal-brusförhållandet är i storleksordningen 1, då $\lambda = 1.0$.

Plottarna på sidorna 13-15 är utförda för $\lambda = 0.5$, och visar att redan efter c:a 100 samplingsintervall har en acceptabel konvergens erhållits.

Matrisen P, dvs kovariansmatrisen för estimationsfelet, fick följande utseende då $\lambda = 0.5$.

$$10^{-3} \begin{bmatrix} 0.257 & 0.161 & 0.081 & -0.012 & -0.057 & -0.078 \\ 0.161 & 0.353 & 0.101 & -0.010 & -0.151 & -0.068 \\ 0.081 & 0.101 & 2.265 & -0.093 & 0.246 & -0.069 \\ -0.012 & -0.010 & -0.093 & 2.175 & -0.058 & 0.032 \\ -0.057 & -0.151 & 0.246 & -0.058 & 2.358 & -0.044 \\ -0.078 & -0.068 & -0.069 & 0.032 & -0.044 & 2.213 \end{bmatrix}$$

De små värdena på elementen i huvuddiagonalen visar, att parametrarna sannolikt är tidskonstanta. En plottning av in- och utsignalerna för $\lambda = 0.5$ visas på sidan 12.

4.2 Tidsvariabla parametrar

Simuleringen med tidsvariabla parametrar utfördes på en modell med samma struktur som i avsnitt 4.1 med den enda skillnaden att a_1 och a_2 antogs ha följande tidsberoende:

$$a_1 = -1.5 + 0.002t$$

$$a_2 = 0.7 + 0.001t$$

Vid identifieringen kommer i detta fall parametrarna 1 och 6 i varje rad att variera med tiden. Därför måste R_1 -matrisen ändras, så att $R_1(1,1)$ och $R_1(6,6)$ får större värden, för att kunna följa parametrarnas tidsberoende.

Plottarna på sidorna 16-19 visar korrekta och estimerade parametervärden, för två olika R_1 -matriser. Härav ses, att man med lämpligt val av R_1 väl kan följa tidsberoende parametrar.

För de tidskonstanta parametrarna erhöles följande resultat:

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} X & 0.99 \\ X & -0.02 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} 0.06 & 0.46 \\ 1.00 & 0.02 \end{bmatrix} u(t+1) + \begin{bmatrix} 0.02 & X \\ 0.02 & X \end{bmatrix} u(t)$$

X betecknar ett tidsvariabelt element.

λ var i detta fall 0.5.

Man ser alltså, att uppskattningen av de tidskonstanta parametrarna i detta fall är lika bra, som när samtliga är tidskonstanta.

4.3 Sammanfattning

De utförda simuleringarna visar, att man med hjälp av Kalmanfilter kan identifiera parametrarna i en struktur av typ (2.2). Vidare visar simuleringen med tidsvariabla parametrar, att man med lämpligt val av R_1 väl kan följa parametrar, som är tidsvariabla.

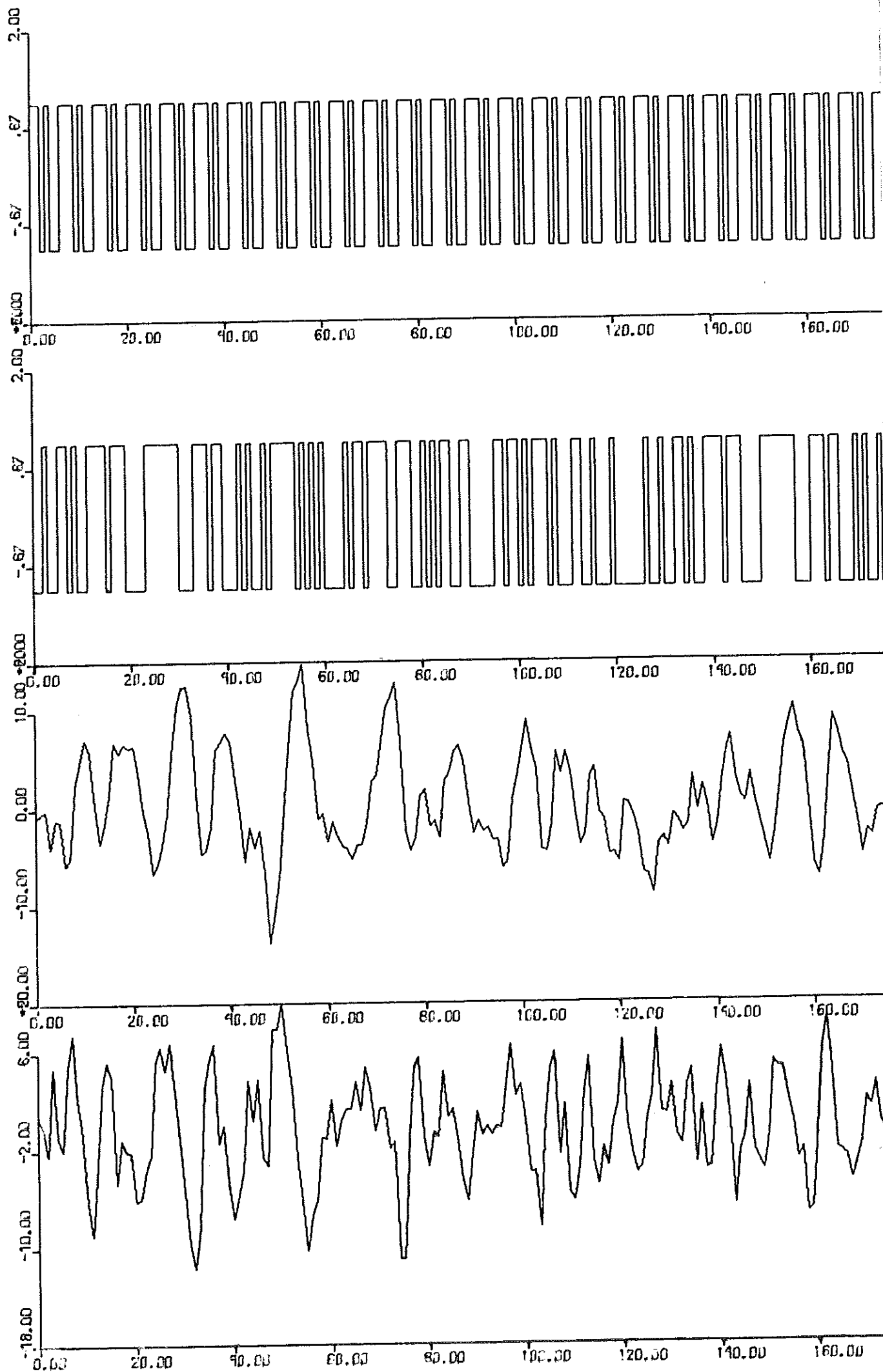


Fig. 4.1 In- utsignaler, simulerad modell

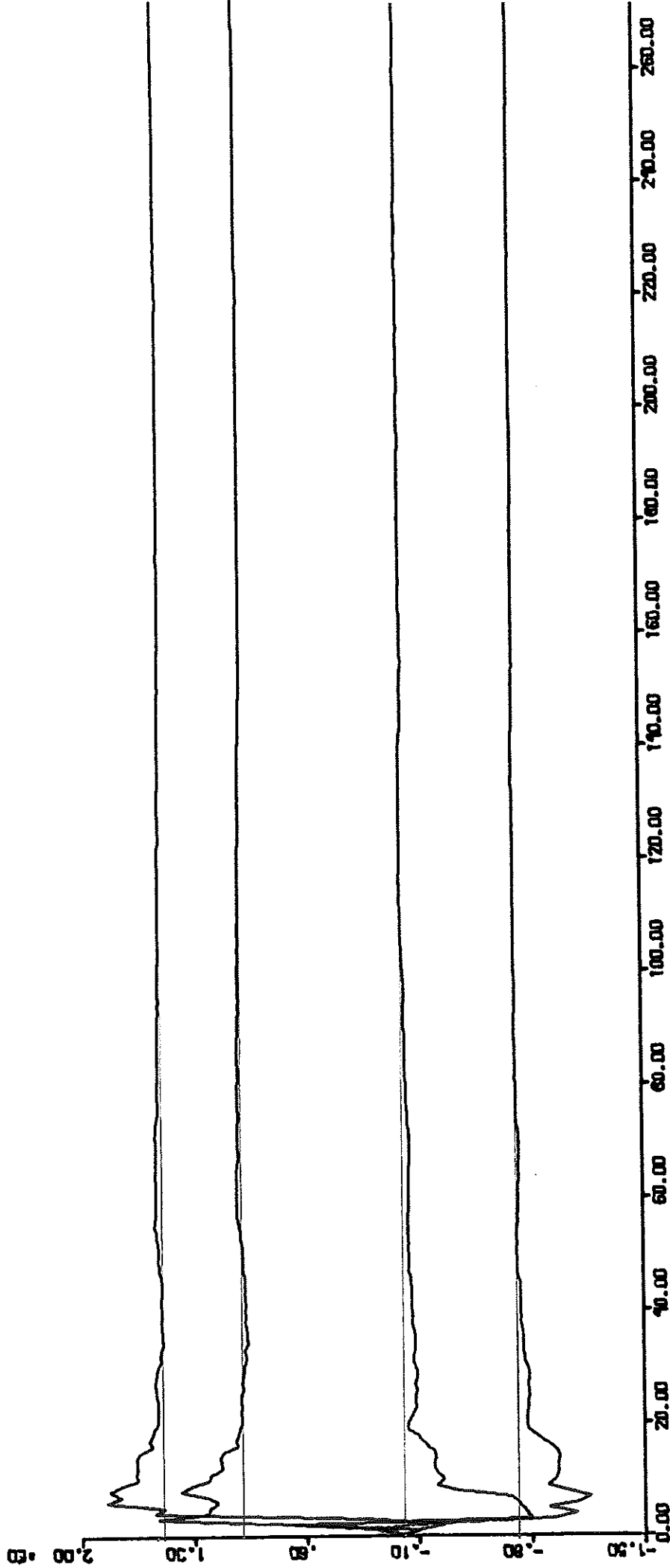


Fig. 4.2 Identifiering på simulerad modell med tidskonstanta parametrar. β -parametrar.

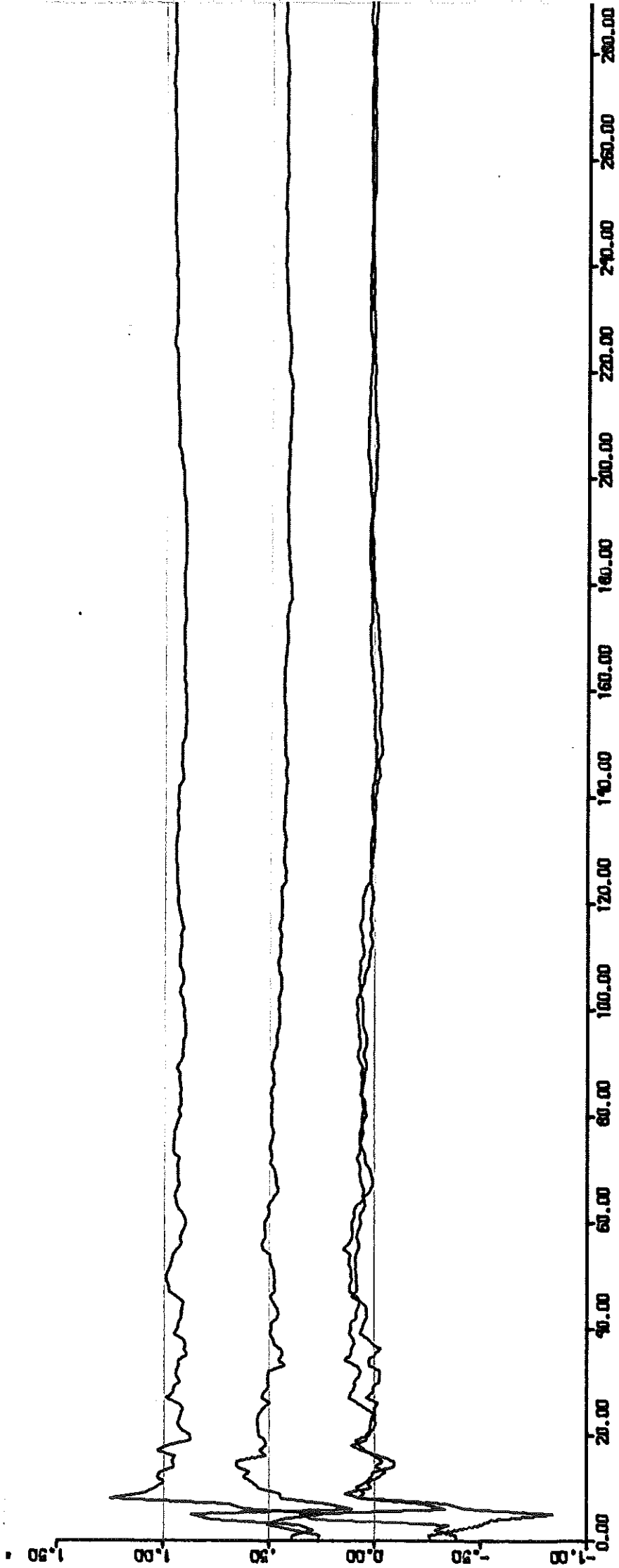


Fig. 4.3 Identifiering på simulerad modell med tidskonstanta parametrar. D-parametrar.

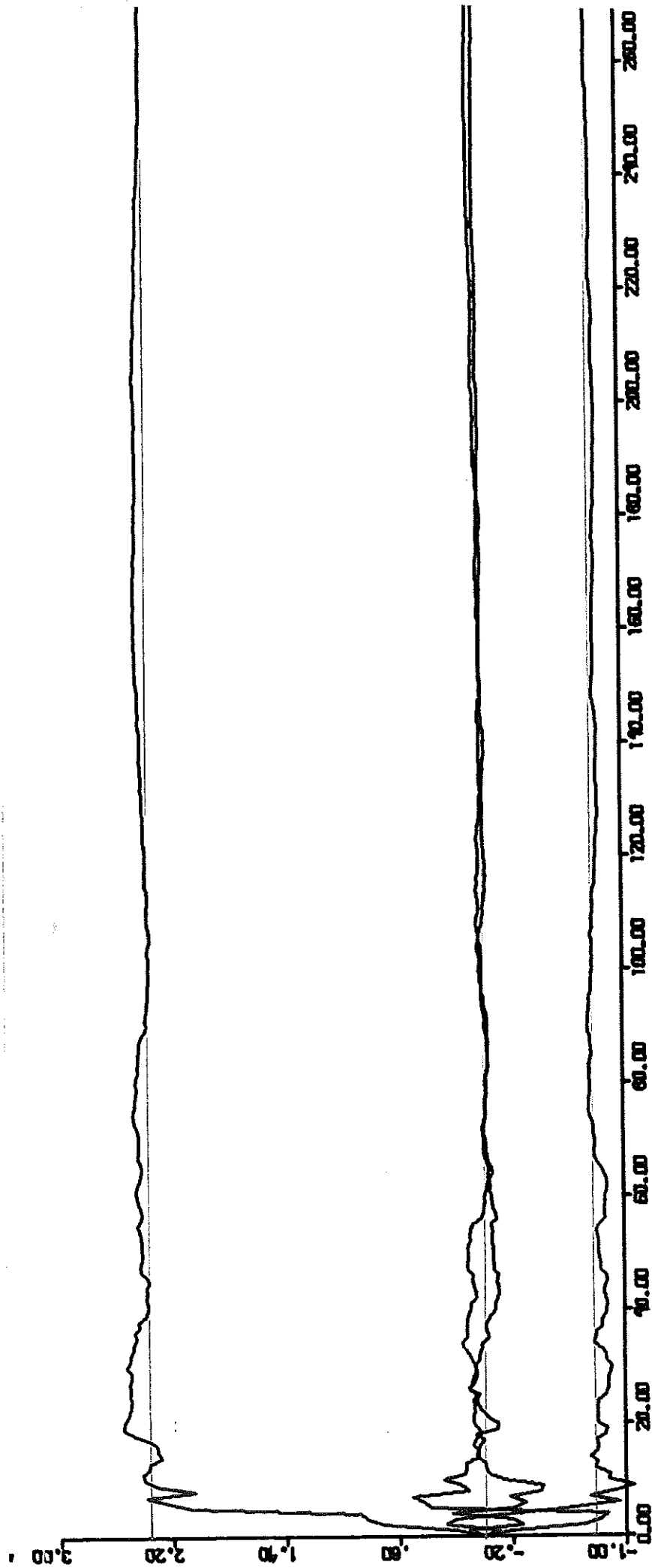


Fig. 4.4 Identifiering på simulerad modell med tidskonstanta parametrar. Γ -parametrar.

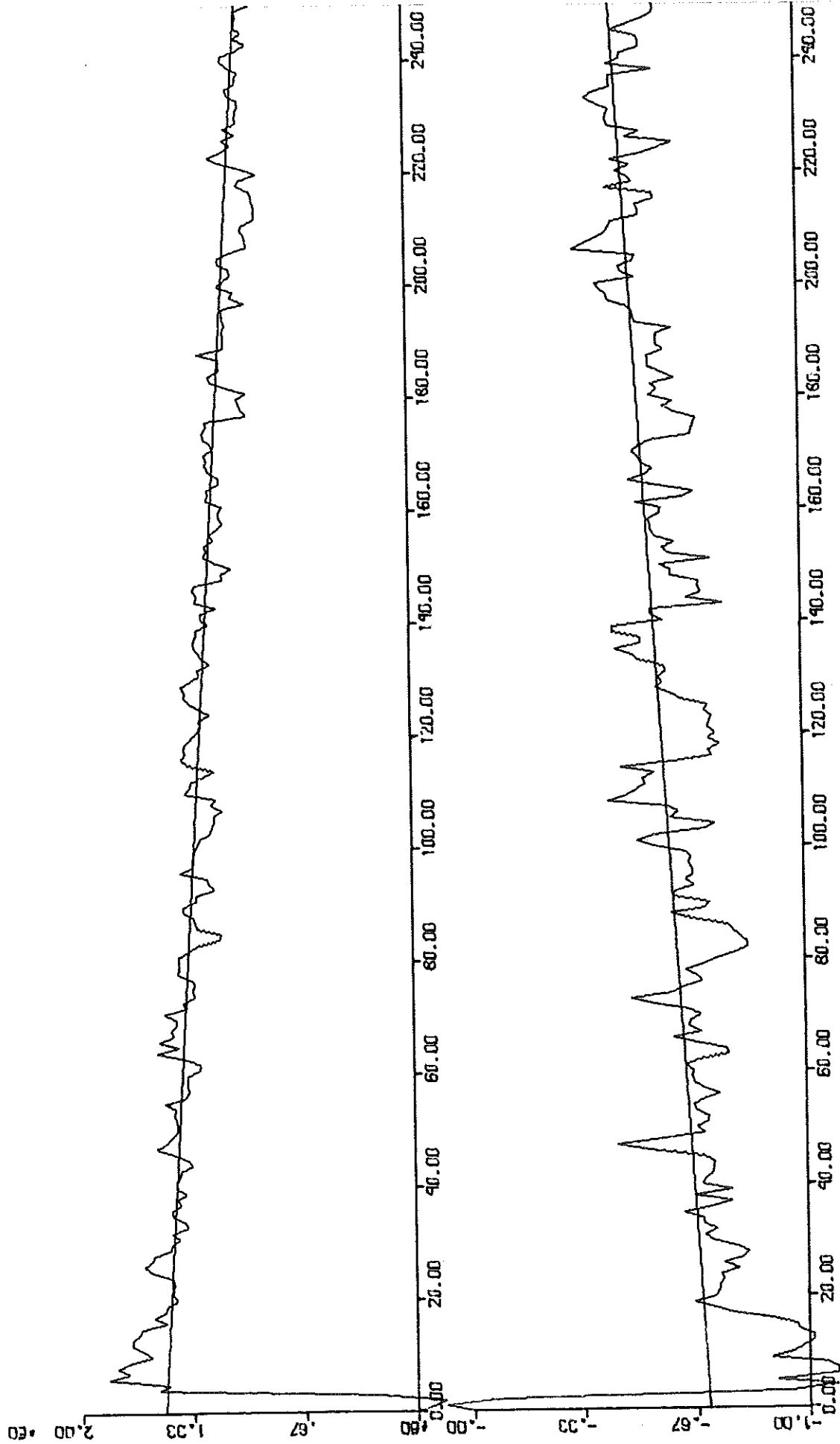


Fig. 4.5 Identifiering på simulerad modell med tidsvariabla parametrar, φ_{11} överst och φ_{21} .

$$R_1(1,1) = R_1(6,6) = 10^{-2}, \text{ Övriga element} = 10^{-6}.$$

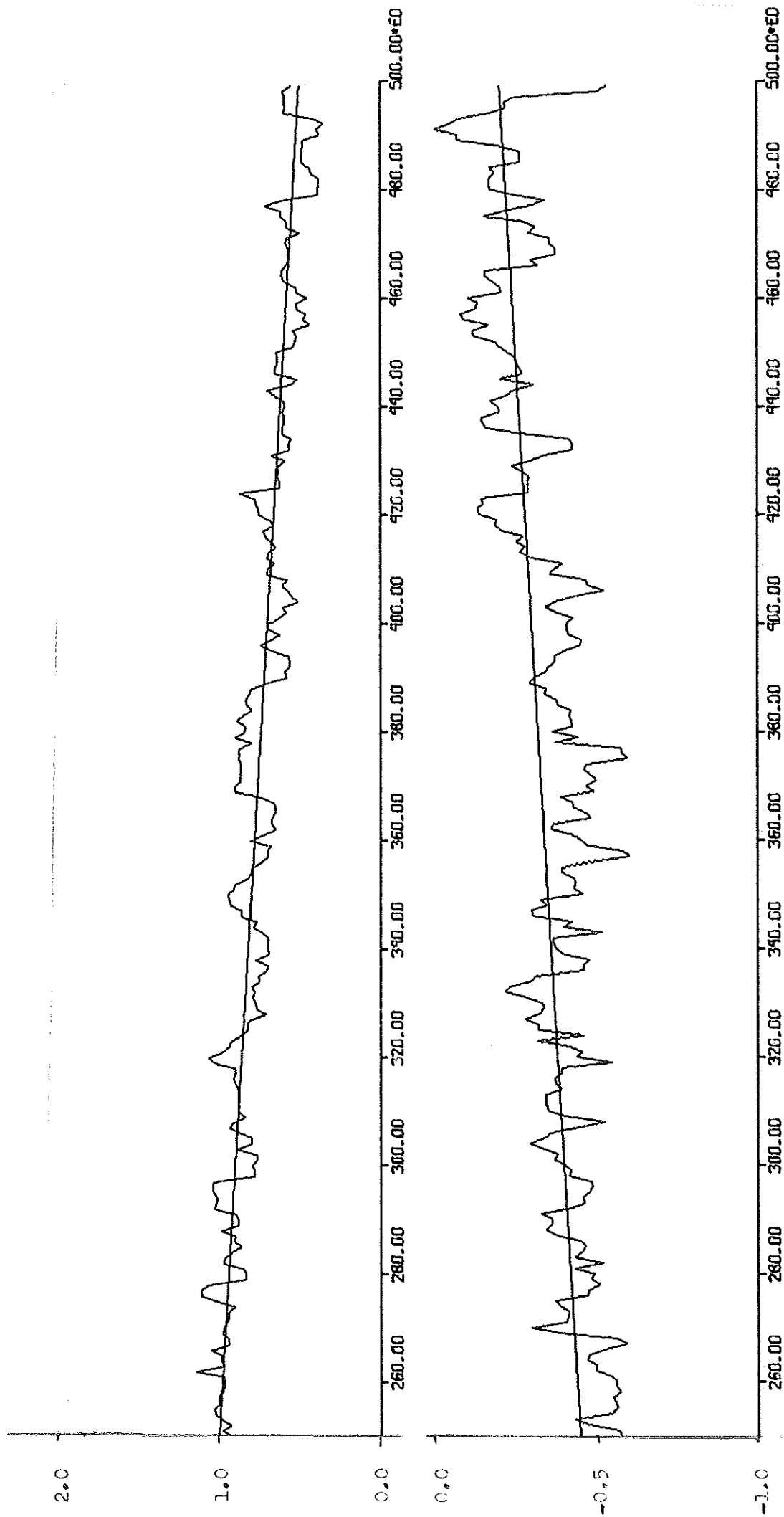


Fig. 4.6 Identifiering på simulerad modell med tidsvariabla parametrar, ϕ_{11} överst och ϕ_{21} .

$R_1(1,1) = R_1(6,6) = 10^{-2}$, Övriga diagonalelement = 10^{-6} .

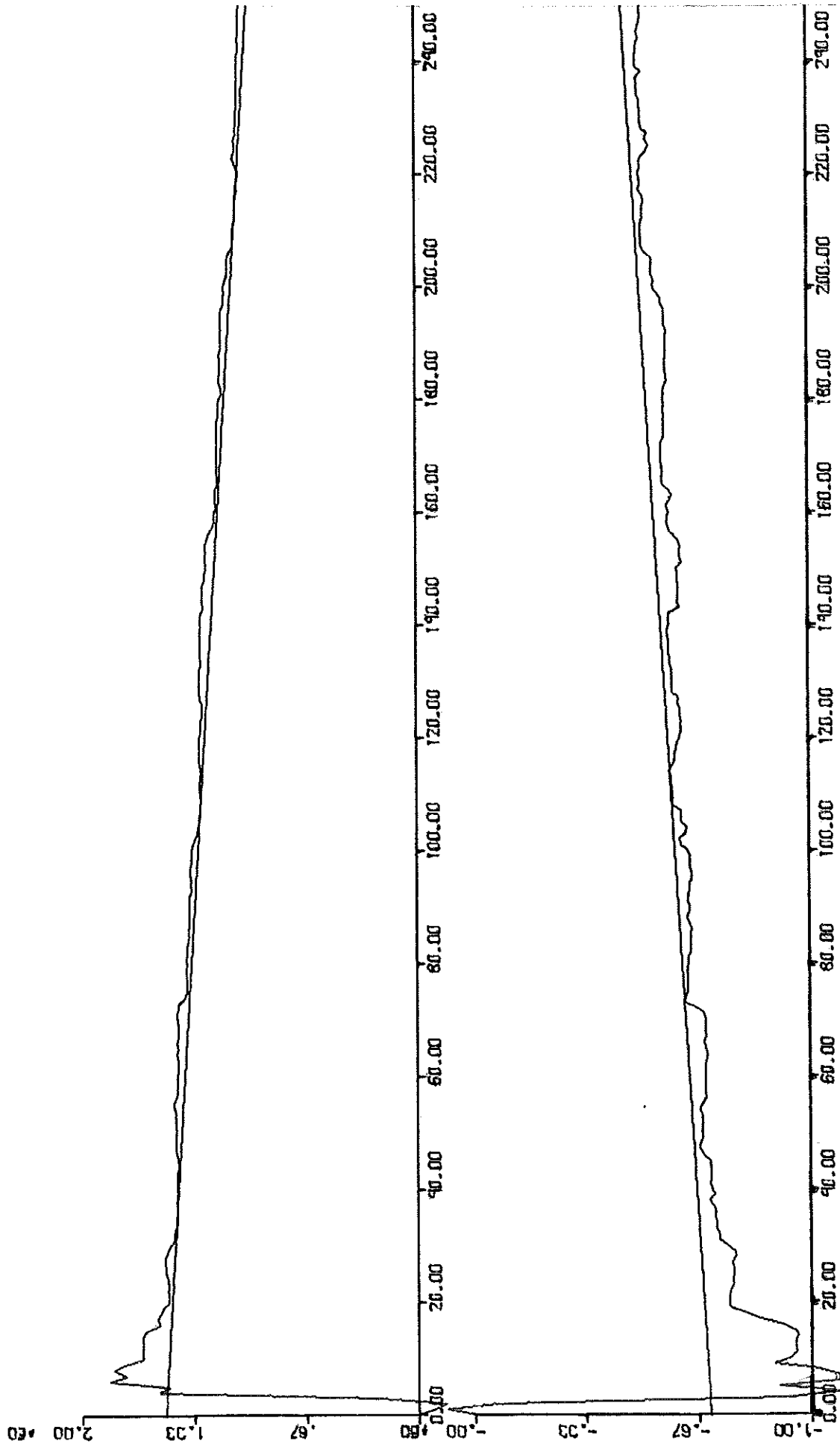


Fig. 4.7 Identifiering på simulerad modell med tidsvariabla parametrar. φ_{11} överst och φ_{21} •
 $R_1(1,1) = R_1(6,6) = 10^{-4}$. Övriga diagonalelement = 10^{-6} .

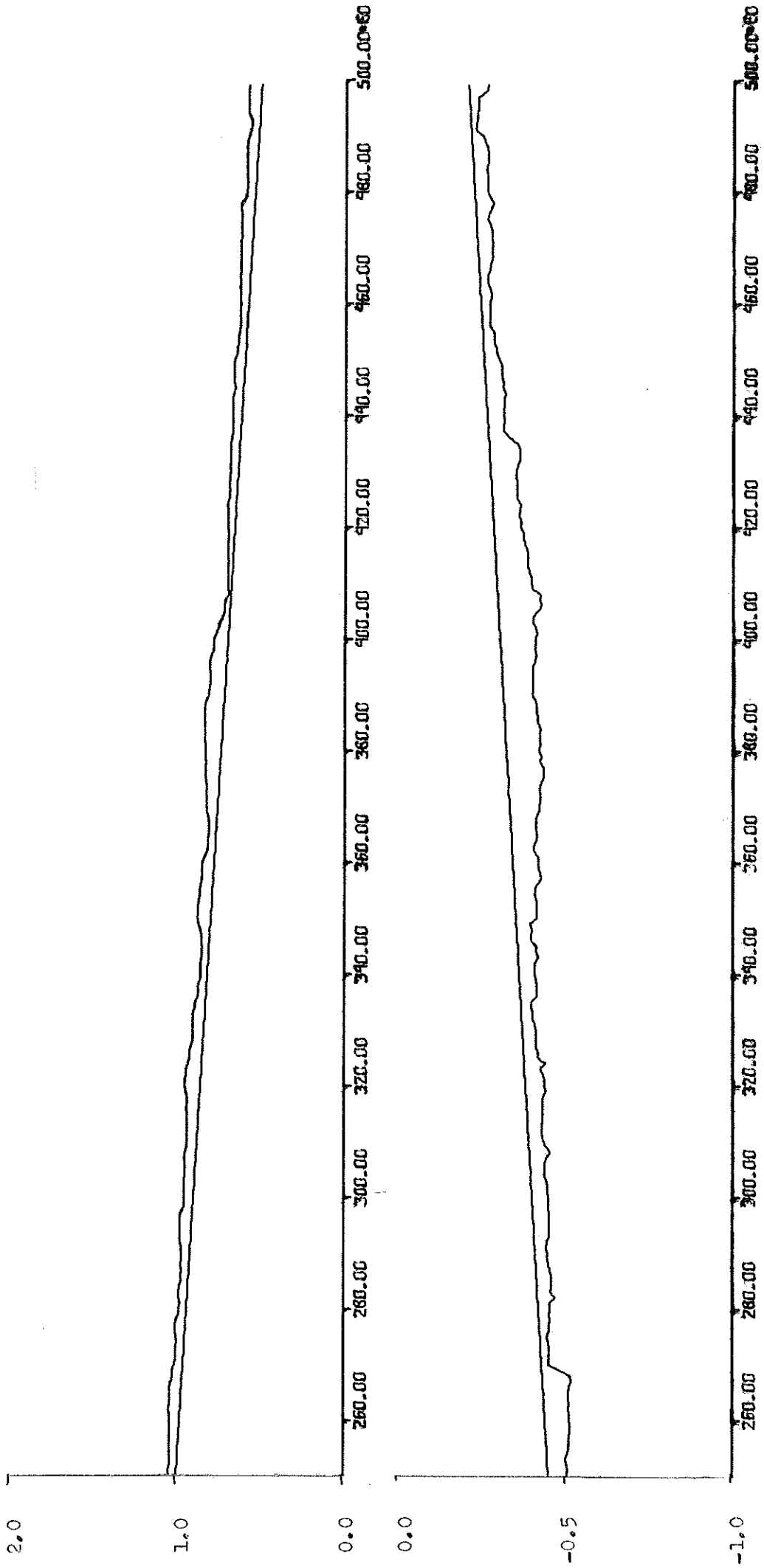


Fig. 4.8 Identifiering på simulerad modell med tidsvariabla parametrar. φ_{11} överst och φ_{21} .

$R_1(1,1) = R_1(6,6) = 10^{-4}$. Övriga diagonalelement = 10^{-6} .

5. Inverkan av mätbrus

I detta avsnitt studeras inverkan av mätbrus, dvs man har:

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t) + v(t) \quad v(t) \in N(0, \lambda_1)$$

$$y(t) = x(t) + Du(t) + e(t) \quad e(t) \in N(0, \lambda_2)$$

eller om $x(t)$ elimineras:

$$y(t+1) = \phi y(t) + Du(t+1) + \Gamma u(t) + e(t+1) - \phi e(t) + v(t) \quad (5.1=2.2')$$

Detta innebär att bruset ej längre är vitt och att man får bias vid användning av Kalmanfilter.

Den modell, som simulerades var samma som i föregående avsnitt, tidskonstanta parametrar. Simuleringen utfördes för tre olika värden på mätbrusets standardavvikelse $\lambda_2 = 0.1, 0.5, 1.0$. Standardavvikelsen för $v(t)$ var i de tre fallen $\lambda_1 = 0.5$.

Följande resultat erhöles:

λ_2	0.1	0.5	1.0	Korreakta värden
ϕ_{11}	1.50	1.45	1.36	1.50
ϕ_{12}	0.99	0.92	0.79	1.00
ϕ_{21}	-0.72	-0.72	-0.70	-0.70
ϕ_{22}	-0.02	-0.01	0.03	0.00
d_{11}	0.07	0.10	0.12	0.00
d_{12}	0.45	0.40	0.34	0.50
d_{21}	1.02	1.03	1.05	1.00
d_{22}	0.00	-0.04	-0.08	0.00
γ_{11}	0.06	0.09	0.18	0.00
γ_{12}	-0.79	-0.68	-0.52	-0.75
γ_{21}	0.02	0.05	0.07	0.00
γ_{22}	2.37	2.39	2.40	2.35

Ovanstående resultat har tagits efter 500 samplingspunkter.

Härav ses, vid en jämförelse med resultaten i avsnitt 4, att vid ett litet mätbrus fås praktiskt taget samma resultat, som utan mätbrus, medan man får en klar avvikelse från de korrekta parametervärdena om mätbruset görs större. Metoden med Kalman-filter bör alltså kunna användas, även om ett litet mätbrus finns på utsignalerna.

Plottarna på sidorna 22 och 23 visar att konvergensen blir ungefär lika snabb med mätbrus som utan. Vidare blir P-matriserna (kovariansmatriserna för estimationsfelet) praktiskt taget identiska om man har mätbrus eller ej (se nedan). Detta betyder, att man inte på något enkelt sätt kan avgöra, om bias föreligger eller ej.

P-matriserna fick följande utseende:

$$\lambda_1 = 0.5 \quad \text{Inget mätbrus}$$

$$10^{-3} \begin{bmatrix} 0.257 & 0.161 & 0.081 & -0.012 & -0.057 & -0.078 \\ 0.161 & 0.353 & 0.101 & -0.010 & -0.151 & -0.068 \\ 0.081 & 0.101 & 2.265 & -0.093 & 0.246 & -0.069 \\ -0.012 & -0.010 & -0.093 & 2.175 & -0.058 & 0.032 \\ -0.057 & -0.151 & 0.246 & -0.058 & 2.358 & -0.044 \\ -0.078 & -0.068 & -0.069 & 0.032 & -0.044 & 2.213 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 = 0.5 \quad \lambda_2 = 1.0$$

$$10^{-3} \begin{bmatrix} 0.244 & 0.136 & 0.084 & -0.023 & -0.043 & -0.060 \\ 0.136 & 0.311 & 0.098 & -0.025 & -0.131 & -0.036 \\ 0.084 & 0.098 & 2.275 & -0.102 & 0.247 & -0.057 \\ -0.023 & -0.025 & -0.102 & 2.179 & -0.047 & 0.035 \\ -0.043 & -0.131 & 0.247 & -0.047 & 2.356 & -0.064 \\ -0.060 & -0.036 & -0.057 & 0.035 & -0.064 & 2.196 \end{bmatrix}$$

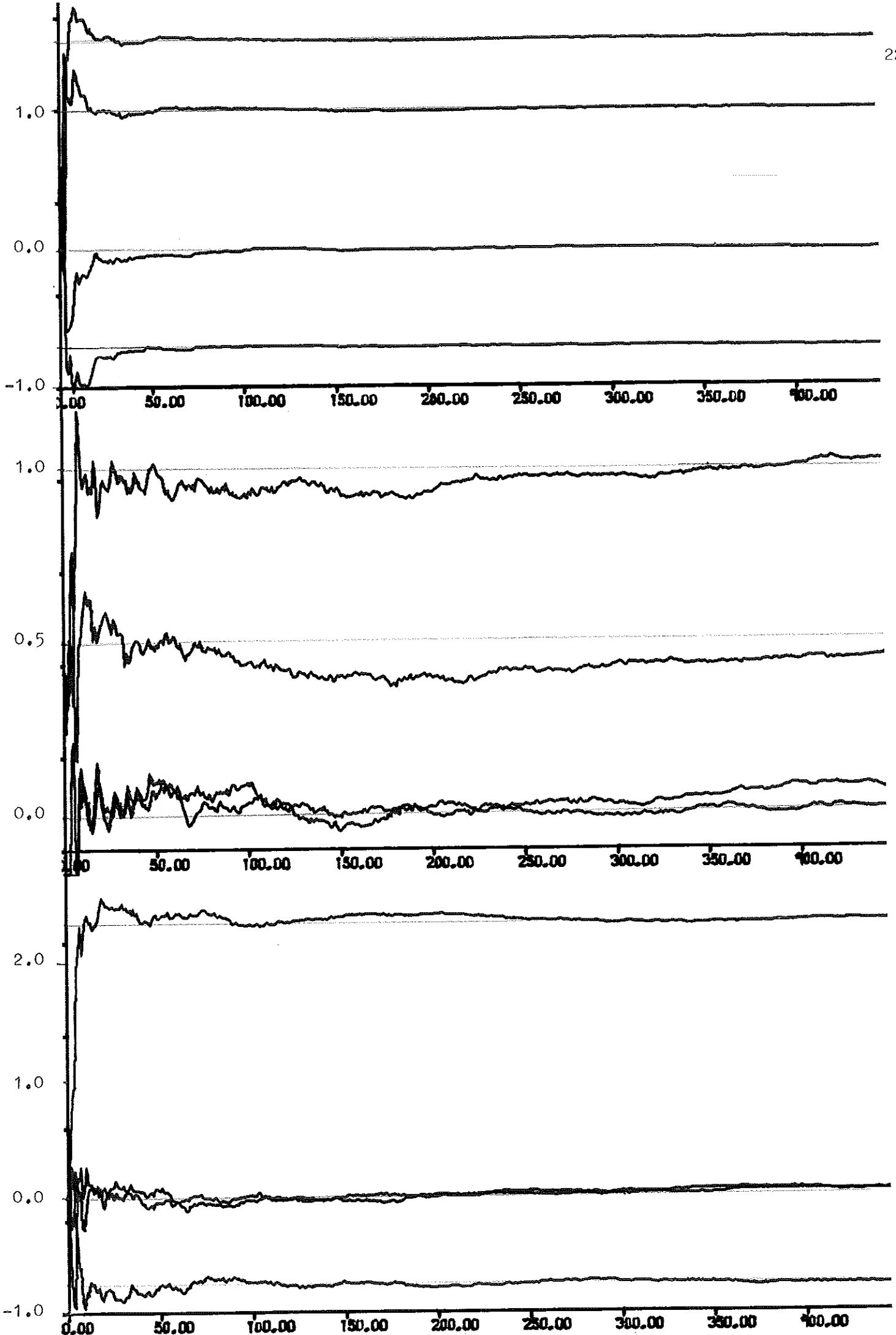


Fig. 5.1 Sim. med mätbrus, $\lambda_2 = 0.1$, I ordning uppfifrån: ϕ , D och Γ .

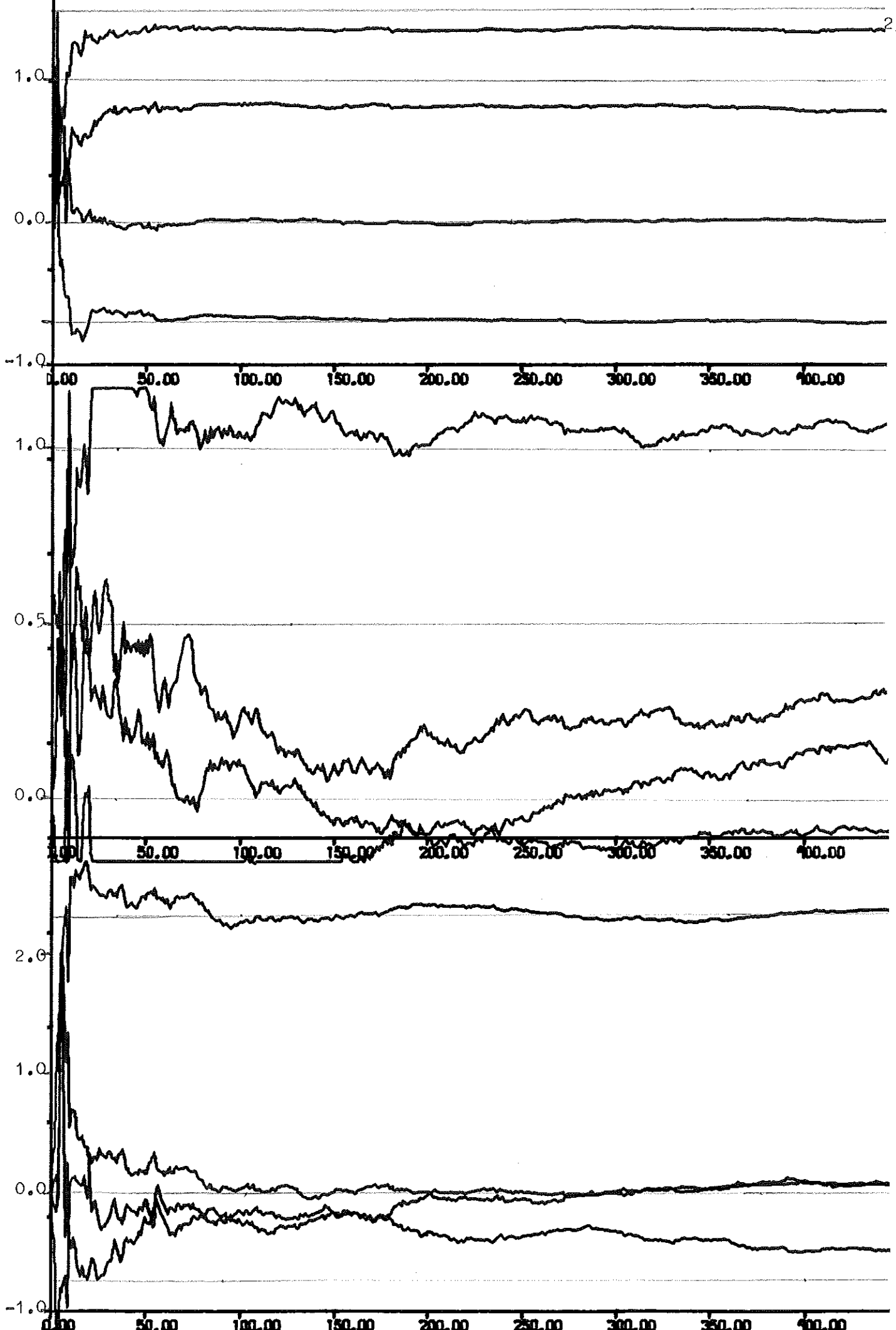
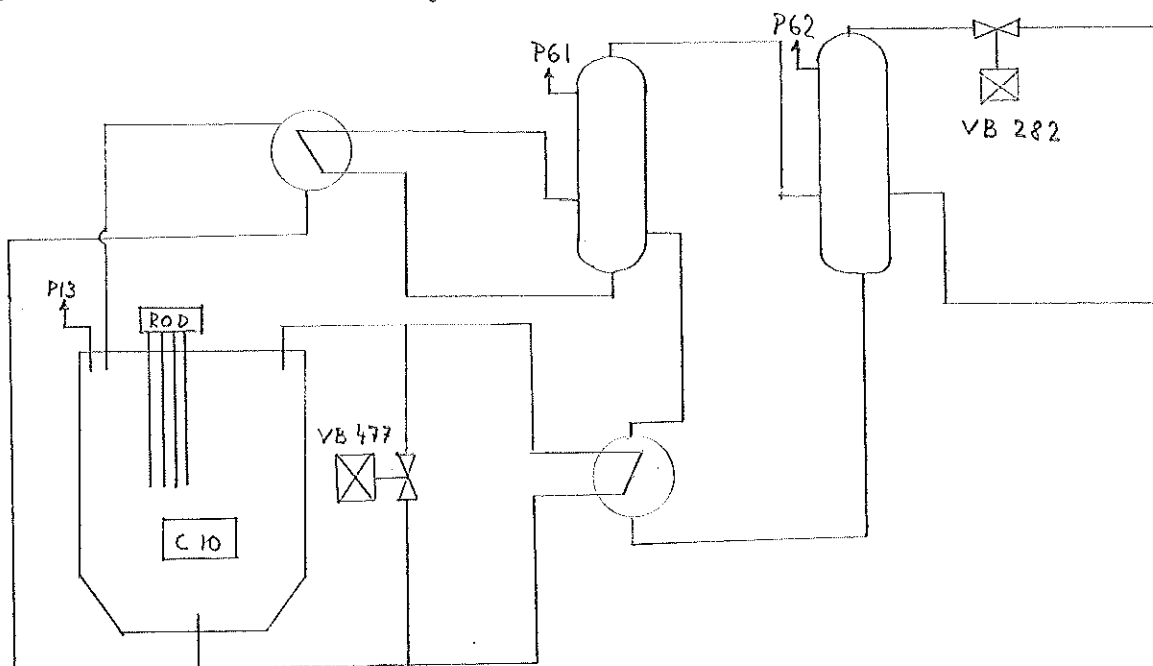


Fig. 5.2 Sim. med mätbrus, $\lambda_2 = 1.0$, I ordning uppifrån: ϕ, D och Γ .

6. Haldenreaktorn

6.1 Kort beskrivning av processen

Haldenreaktorn är en kokarreaktor med tungt vatten som moderator. Den används sedan 1958 som forskningsreaktor för OECD. Den maximala nukleära effekten är c:a 25 MW. Följande figur ger en schematisk bild av systemet.



Systemet består alltså av tre cirkulationskretsar. Dessa kallas i ordning från reaktorn till effektförbrukaren för primär-, sekundär- respektive tertiärkretsen. Den tunga vattenången cirkulerar i primärkretsen till värmeväxlare, där den kondenseras. I sekundärkretsen produceras då lättvattenånga, som i sin tur producerar ånga i tertiärkretsen. Denna ånga når sedan konsumenten via en ventil (VB 282), som används som insignal. Tungt vatten kan också tas från reaktorkärlet till en underkylningskrets. Underkylningsgraden kontrolleras med hjälp av en ventil (VB 477). Maximalt kan c:a 2.2 MW tas ut från underkylningskretsen. Allmänt sett gäller att stabiliteten hos systemet ökar med ökad underkylning. Trycken kallade P13, P61 resp. P62 i de tre kretsarna kan mätas direkt med hjälp av differenstryckmätare. Dessa tryck utgör utsignalerna från processen.

Den nukleära effekten (C10) kontrolleras av ett antal styrstavar (ROD), vilka här utgör den andra signalen till processen. Dessa stavar kan föras upp eller ned i reaktorhärden. Då stavarna förs ned absorberas neutroner, varigenom reaktiviteten och därmed den nukleära effekten minskar. Vid en ökning av reaktiviteten fås en momentan ökning av nukleära effekten, men därigenom ökar också ångbildningen. På grund av voidåterkopplingen, samt temperaturökning i bränslet får man då en minskning av reaktiviteten och därmed av nukleära effekten. Denna återkoppling är starkt beroende av en rad faktorer som t. ex. underkylningsgraden och den totala effekten.

Även kopplingen mellan ventilen VB282 och nukleära effekten påverkas av voidåterkopplingen. En öppning av ventilen minskar ångtrycket. Denna minskning ger upphov till en ökad ångbildning i reaktortanken, varvid reaktiviteten och därmed den nukleära effekten avtar. Detta medför att ångbildningen minskar på nytt, varefter nukleära effekten åter ökar. Underkylningsgraden är sedan avgörande för hur effekten förändras i det stationära läget. Underkylningen avgör nämligen kokgränsens läge. Vid högre underkylning uppvisar systemet ett icke-minimumfas beteende. En mera detaljerad beskrivning av processen återfinns i ref. [1] och [3], där även ytterligare referenser ges.

6.2 Insignalen

Som insignal har en s.k. PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) använts. Denna signal är periodisk, med en period som i detta fall är 1100 samplingsintervall. Samplingsintervallets längd är 2 sekunder.

För att undvika drift i signalerna har insignalen korrigerats med avseende på de längsta pulserna. Den längsta pulsen i denna korrigerade signal är 98 samplingsintervall eller 196 sekunder. De två insignalerna är förskjutna 500 samplingsintervall i förhållande till varandra.

6.3 Mätserierna

Två olika mätserier har studerats, en ur EP 714-B i fortsättningen kallad RUN 10, samt en ur exp. 714/2 fortsättningsvis benämnd RUN 8. Data för dessa experiment finns lagrade på band. I appendix A är beskrivet hur de är lagrade, samt program för läsning från banden. Det har visat sig att insignalerna har registrerats ett samplingsintervall senare än utsignalerna, varför insignalerna måste skiftas ett steg framåt. Insignalerna, som antar värdena 0 eller 1, har för RUN 10 översatts till lämplig fysikalisk enhet, nämligen % öppning (ventilerna) samt antalet steg (styrstavarna). För att erhålla större amplitud i reaktiviteten har flera stavar rörts parallellt.

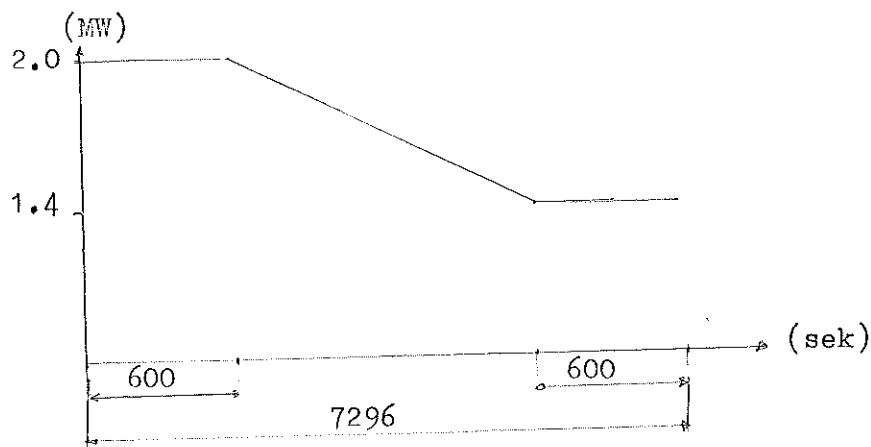
Följande stationära data gäller för RUN 10:

Total effekt	Underkylning	Insignalamplituder	
10 MW	1.95 MW	VB 282	ROD
		± 2.5%	3 stavar 1 steg

En plottning av in- och utsignalerna visas på sidan 28. Tidsaxeln är graderad i antalet samplingsintervall. Plottningen börjar efter 1100 samplingsintervall, då det är dessa, som använts vid identifieringen. Anledningen till detta är att utsignalen i intervallet mellan 950 och 1100 har ett uppträdande, som av fysikaliska skäl ej hör till reaktordynamiken.

Vid det andra experimentet RUN 8 lät man underkylningen minska längs en ramp. Som tidigare sagts medför detta att stabiliteten minskar, och man kan därför vänta sig, att parametrarna uppvisar ett tidsberoende.

Underkylningen ändrades på följande sätt:



Rampens medellutning var 0.1 W/s.

Under de första 600 sekunderna gällde alltså samma data som under RUN 10, varför den från detta experiment erhållna modellen kan användas som startvärde vid identifieringen på RUN 8.

Det verkliga utseendet på underkylningsrampen visas på sid. 30 och 31.

Den totala effekten var 10 MW och insignalamplituderna var:

VB 282 ROD

± 2.5% 2 stavar 1 steg

En plottning av experimentet återfinns på sid. 29.

Tidsaxeln är graderad i samplingsintervall.

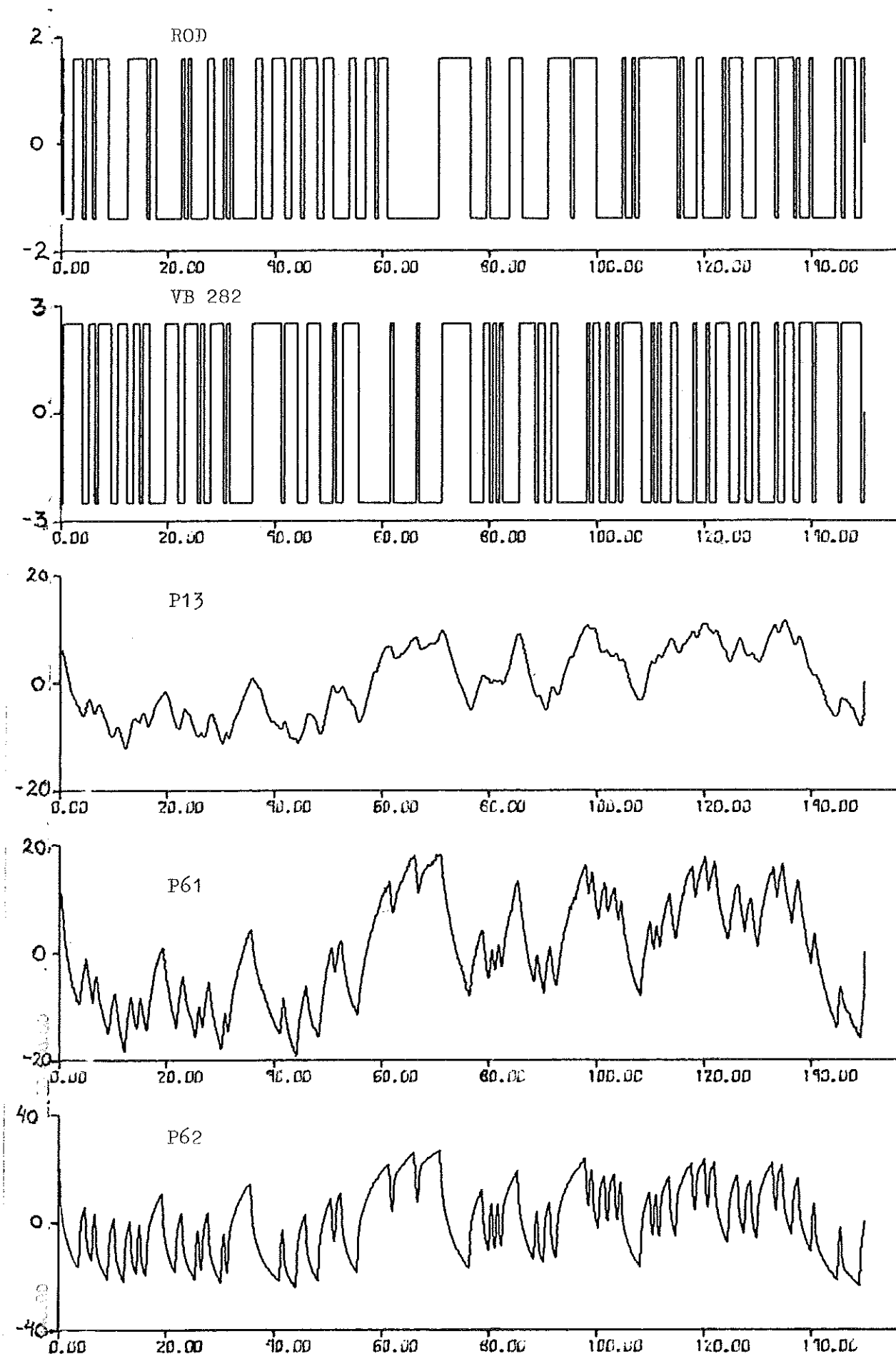


Fig. 6.1 In och utsignaler RUN 10, samplingspunkter 1100-2600
Obs. tryckerna är multiplicerade med 1000.

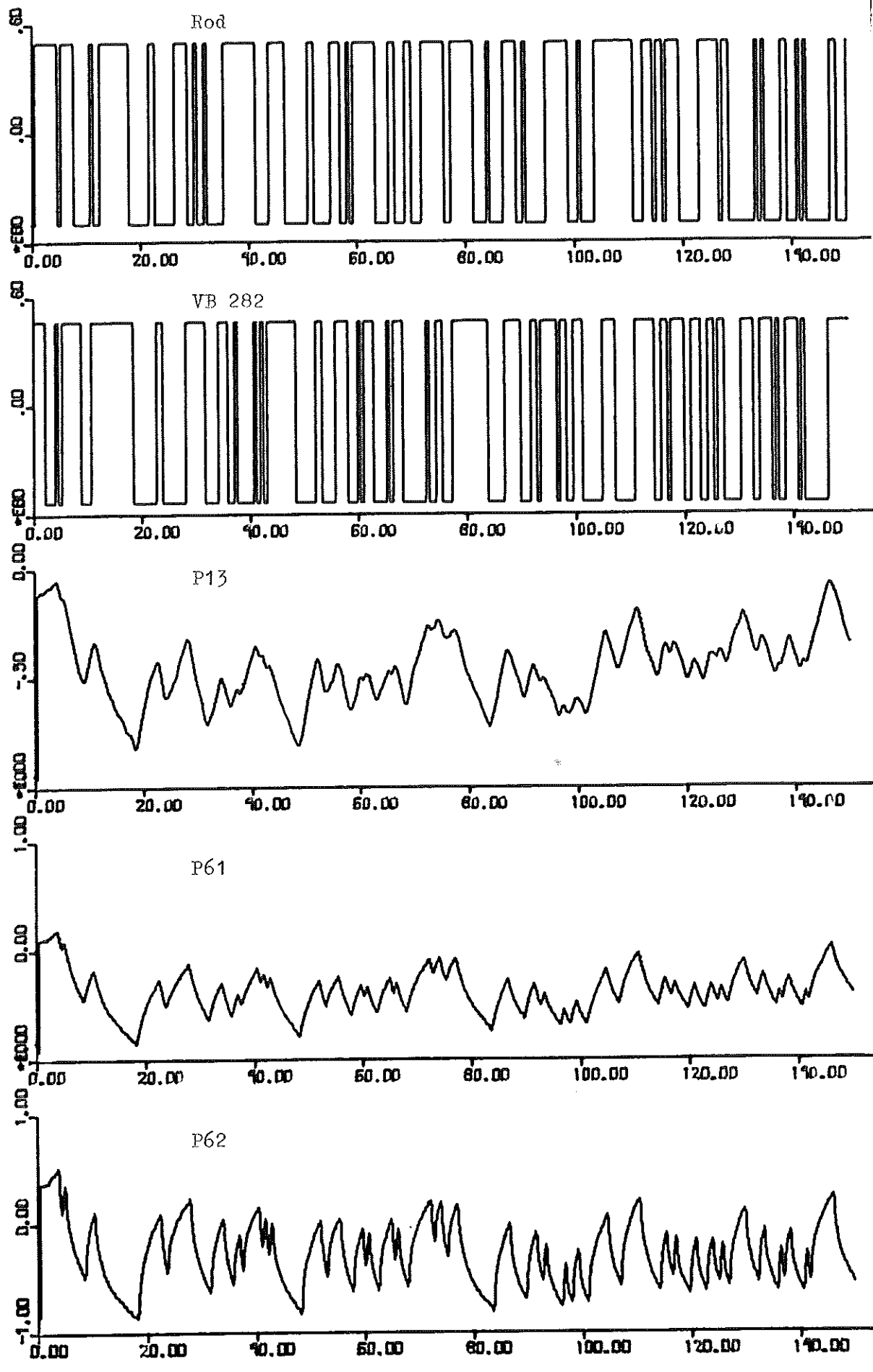


Fig. 6.2 In- och utsignaler RUN 8, samplingspunkter 1-1500

- 6.3.1 NOMINAL REACTOR CONDITIONS $Q_1=10\text{MW}$ $Q_2=2\text{MW}$ $T_2=230\text{ DEG}$
- 6.3.2 OPERATING DURING 600 SEC \dot{Q}_2 RAMP 0.33 KW/MIN \dot{Q}_2 CONST DURING 600 SEC
- 6.3.3 CONTROL PERFORMED WITH VALVE VG477
- 6.3.4 STEADY-STATE PERFORMANCES RES 20 AND 21 1STEP $\Delta V_{20,21} = \pm 0.5$ PERCENT VALVE LIFT

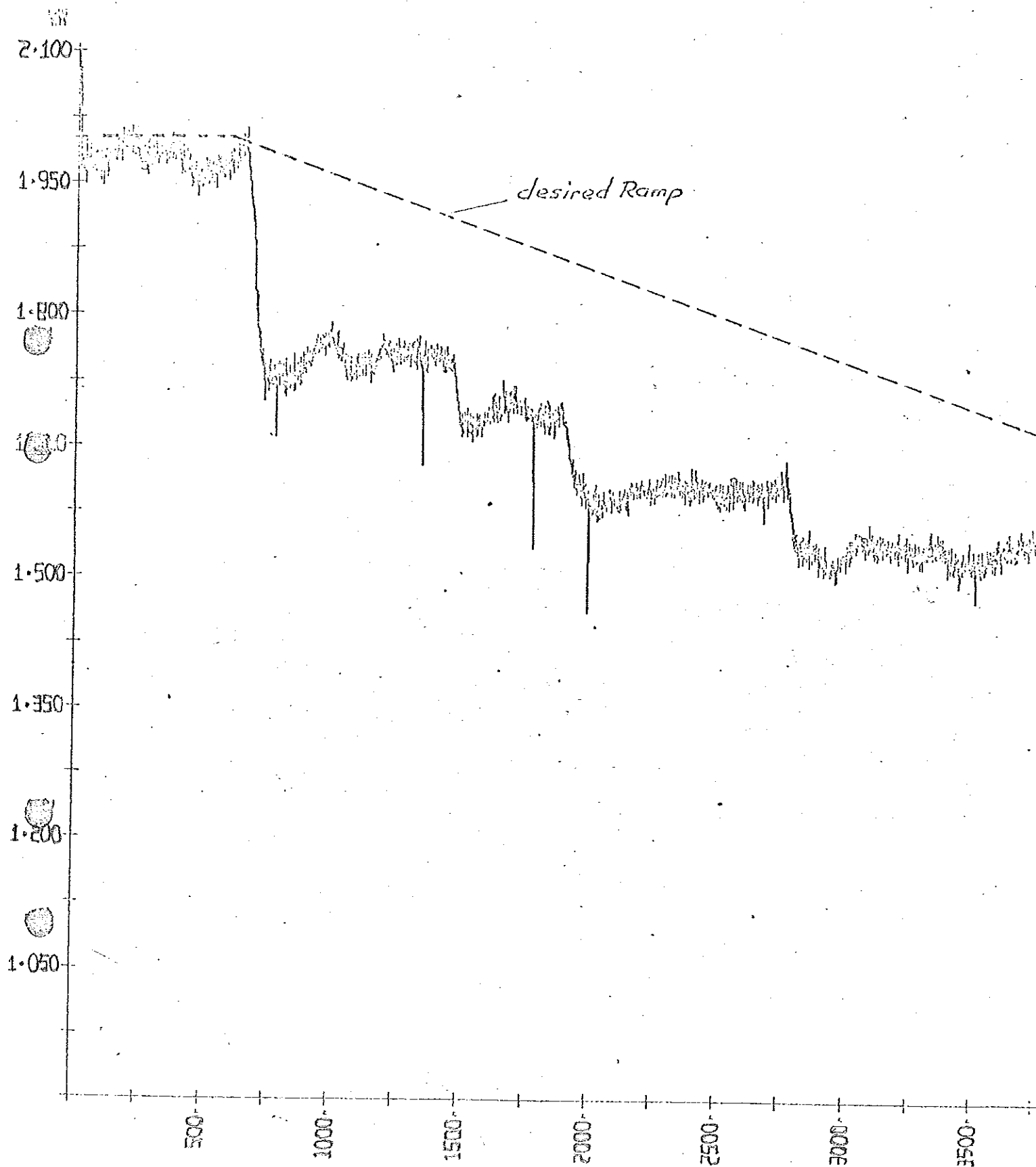


Fig. 6.3 Verklig och önskad underkylningsramp RUN 8
0- 3750 sekunder

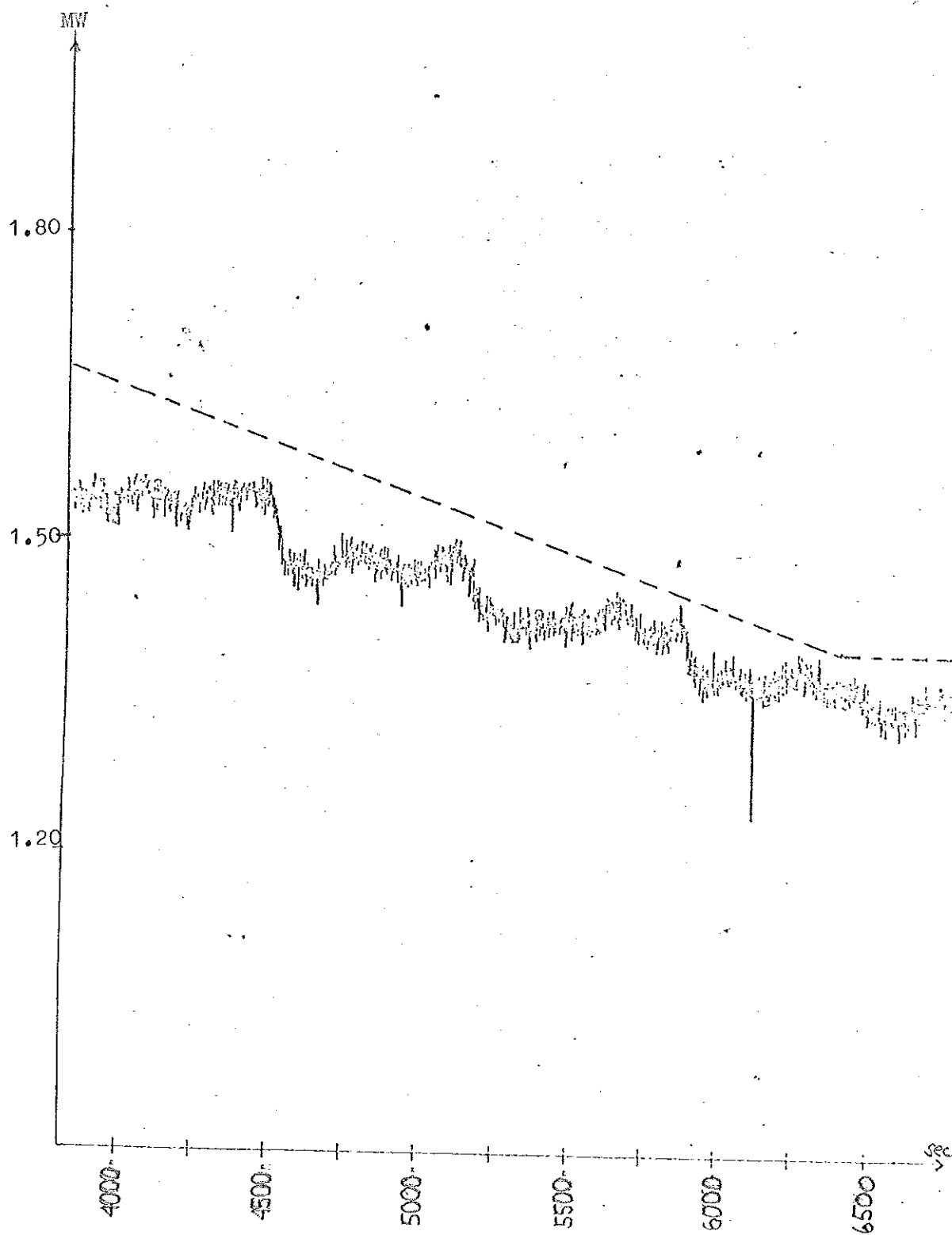


Fig. 6.4 Verklig och önskad underkylningsramp RUN 8
3750- 7296 sekunder

7. Identifiering

Den modell som studeras är alltså (se avsnitt 2):

$$y(t+1) = \phi y(t) + Du(t+1) + \Gamma u(t) + v(t) \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} \text{där } y_1 &= P13 & u_1 &= \text{ROD} \\ y_2 &= P61 & u_2 &= \text{VB 282} \\ y_3 &= P62 \end{aligned}$$

Man kan av fysikaliska skäl tilldela matriserna D och Γ en speciell struktur. Sålunda kommer matrisen D att ha endast ett element skilt från noll. Detta element är d_{11} dvs. man antar, att endast kopplingen mellan styrstavarna och primärtrycket påverkas via en direktterm. Matrisen Γ antas vara fylld med undantag av elementet γ_{31} , som sättes lika med noll. Detta innebär, att styrstavarnas inverkan på tertiärtrycket försummas.

7.1 Identifiering på RUN 10

Vid identifieringen användes data mellan 1100 och 3600 samlingsintervall, och utsignalerna multiplicerades med 1000 för att erhålla samma storleksordning på in- och utsignaler. Identifieringen utfördes radvis i (7.1) med hjälp av subrutinen KALID. I denna skall matrisen R_1 tilldelas ett lämpligt värde, och enligt tidigare är det lämpligt att välja $R_1 = r \cdot I$. Inledningsvis gjordes ett antal identifieringar med olika värden på r och samtidigt beräknades förlustfunktionerna V_i , där $V_i = \sum e_i^2(t)$ där $e_i(t) = y_i(t) - \hat{y}_i(t)$; $i = 1, 2, 3$

Nedanstående tabell ger en sammanfattning av resultatet.

r	V_1	V_2	V_3
0.1	61.7	632.3	1184.4
0.01	55.8	584.9	1121.3
0.001	50.5	526.5	1085.2
0.0001	53.7	530.4	1142.6
0.00001	55.2	558.7	1201.0

Ur denna tabell fås att $r = 0.001$ är ett lämpligt värde.

Vid denna inledande undersökning visade det sig, att parametrarna konvergerade mycket långsamt. Därför utfördes ett antal identifieringar, där som startvärden på parametrarna användes parameteruppsättningen från föregående identifiering. Därvid kunde en minskning av förlustfunktionerna iakttagas, samtidigt som parametrarna uppvisar bättre konvergens. Nedanstående tabell visar hur förlustfunktionerna minskar med antalet iterationer.

n	V_1	V_2	V_3
1	50.5	526.5	1085.2
2	18.2	374.9	708.4
3	17.9	368.3	675.5
4	17.9	368.3	674.8

En plottning av parametrarna visas på sidorna 35 - 37.

Som initialvärden har värden från tidigare körningar använts. Vid denna plottning har R_1 för andra raden minskats till 10^{-5} , då man därigenom får en något mindre förlustfunktion ($V_2 = 359.8$ istället för $V_2 = 368.3$), och ett mindre oscillativt uppträdande hos parametrarna. Dessa har nu konvergerat och följande värden erhålles efter korrektion av utsignalen:

$$\phi = \begin{bmatrix} 0.926 & 0.024 & 0.030 \\ 0.152 & 0.832 & 0.030 \\ 0.120 & 0.208 & 0.672 \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = -0.30 \cdot 10^{-5}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.79 \cdot 10^{-4} & 0.18 \cdot 10^{-6} \\ -0.19 \cdot 10^{-4} & -0.22 \cdot 10^{-3} \\ 0 & -0.14 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Ur förlustfunktionerna kan approximativa värden på standardavvikelserna för bruset beräknas, ty $\lambda_i^2 \approx (1/N)\sum e_i^2(t) = (1/N)V_i$

Här fås:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 8.9 \cdot 10^{-5} \\ \lambda_2 &= 3.7 \cdot 10^{-4} \\ \lambda_3 &= 5.6 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

ϕ -matrisen är alltså diagonaldominant vilket är rimligt av fysikaliska skäl. P-matrisen (kovariansmatrisen för estimationsfelet) har följande utseende:

$$\begin{bmatrix} 0.027 & -0.025 & 0.012 & <10^{-3} & -0.001 & 0.001 \\ -0.025 & 0.042 & -0.012 & 0.001 & 0.001 & -0.003 \\ 0.012 & -0.012 & 0.013 & -0.001 & -0.001 & 0.002 \\ <10^{-3} & 0.001 & -0.001 & 0.005 & -0.002 & <10^{-3} \\ -0.001 & 0.001 & -0.001 & -0.002 & 0.005 & <10^{-3} \\ 0.001 & -0.003 & 0.002 & <10^{-3} & <10^{-3} & 0.003 \end{bmatrix}$$

De små värdena på diagonalelementen tyder på att parametrarna är tidskonstanta. Elementen i det övre vänstra hörnet av P är c:a 10 ggr så stora som övriga element, vilket beror på, att dessa hänför sig till ϕ -parametrarna, vilka är betydligt större än övriga parametrar. Det oroliga beteendet hos några av parametrarna efter c:a 800 samplingsintervall kan bero på att bägge insignalerna då under en längre tid antog värdet 1. Vidare gör det stora antalet parametrar, som skall bestämmas, att osäkerheten i skattningen blir ganska stor.

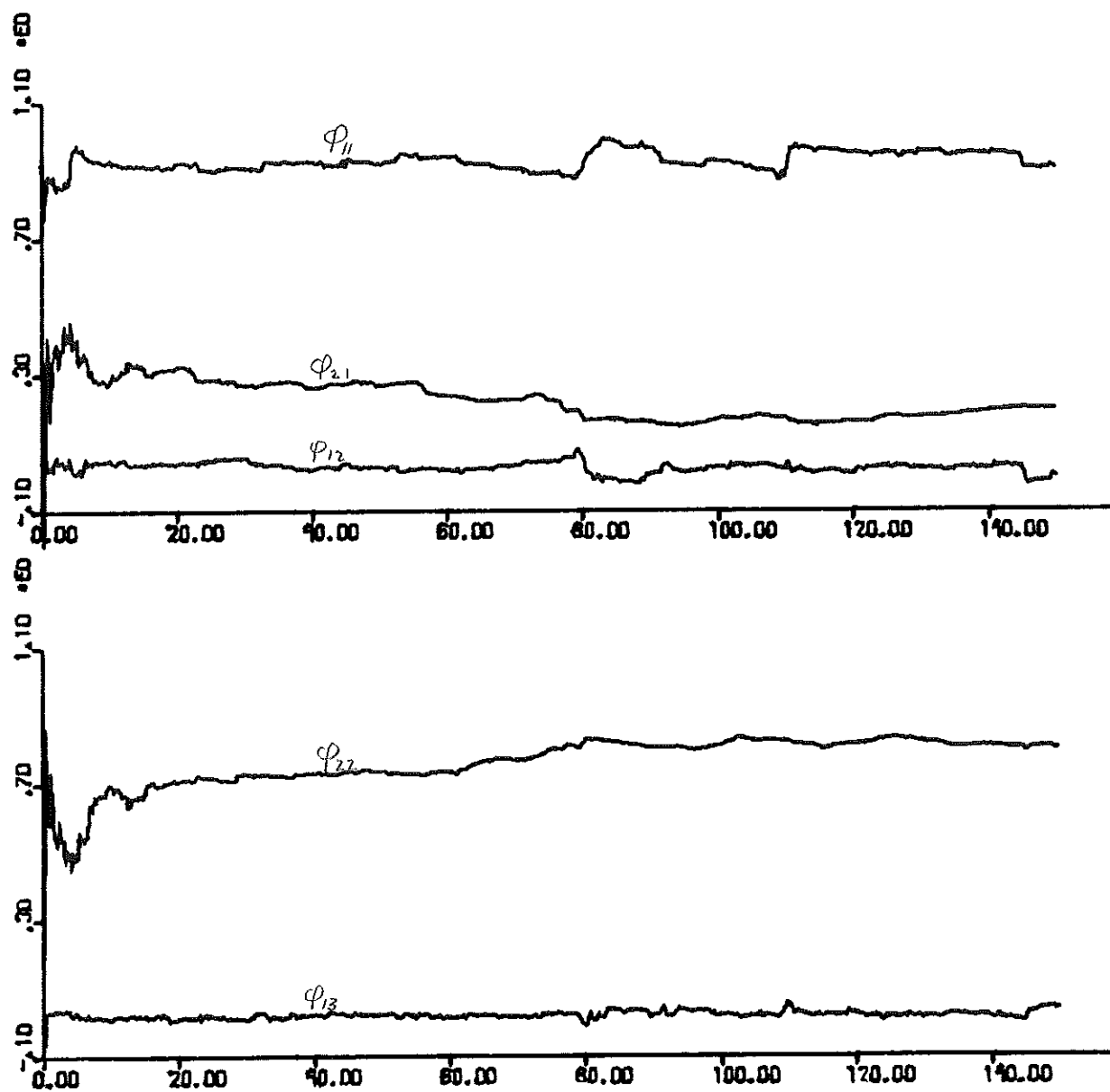


Fig. 7.1 Identifiering på RUN 10; ϕ -parametrar

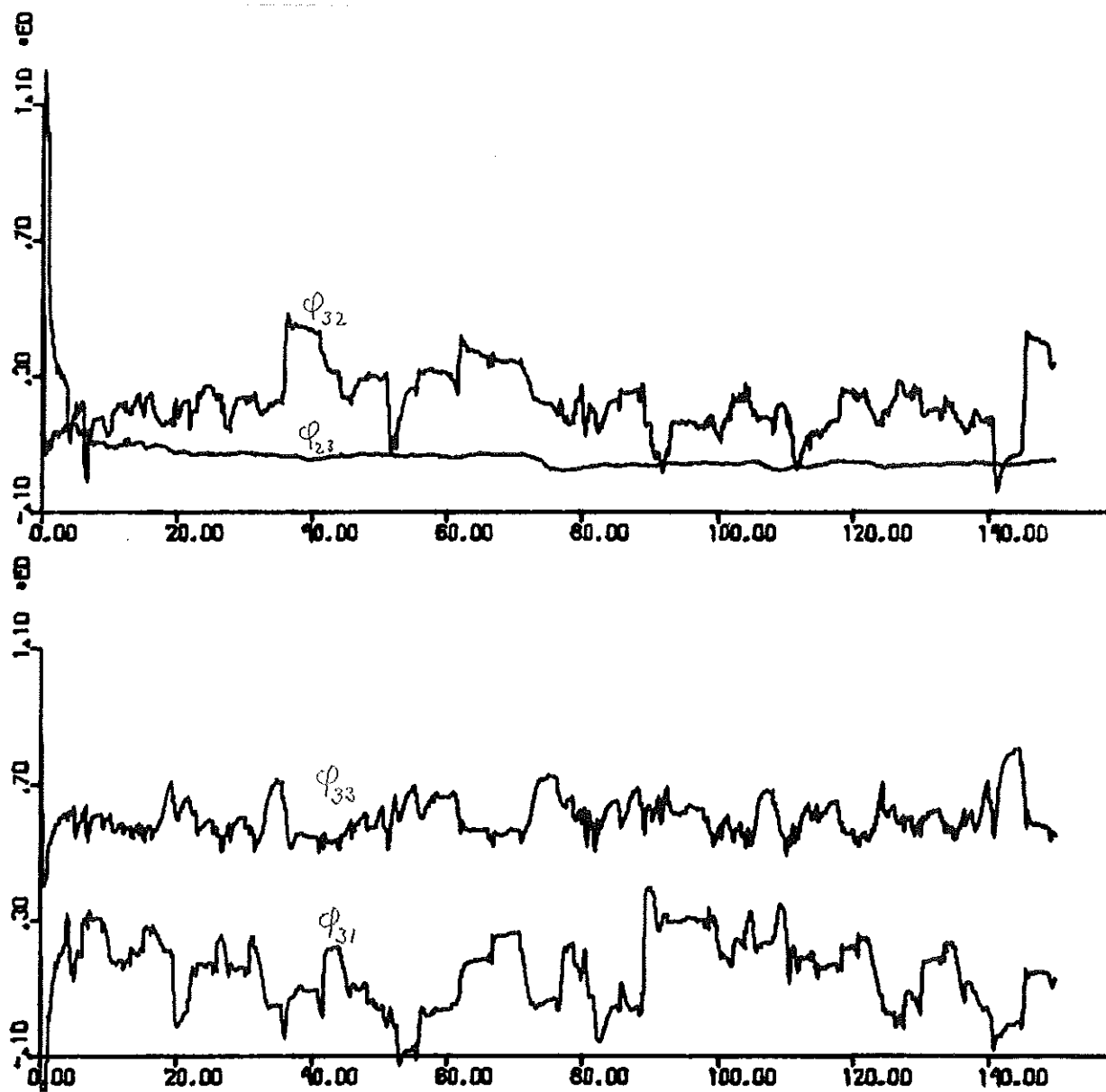


Fig. 7.2 Identifierring på RUN 10; ϕ -parametrar

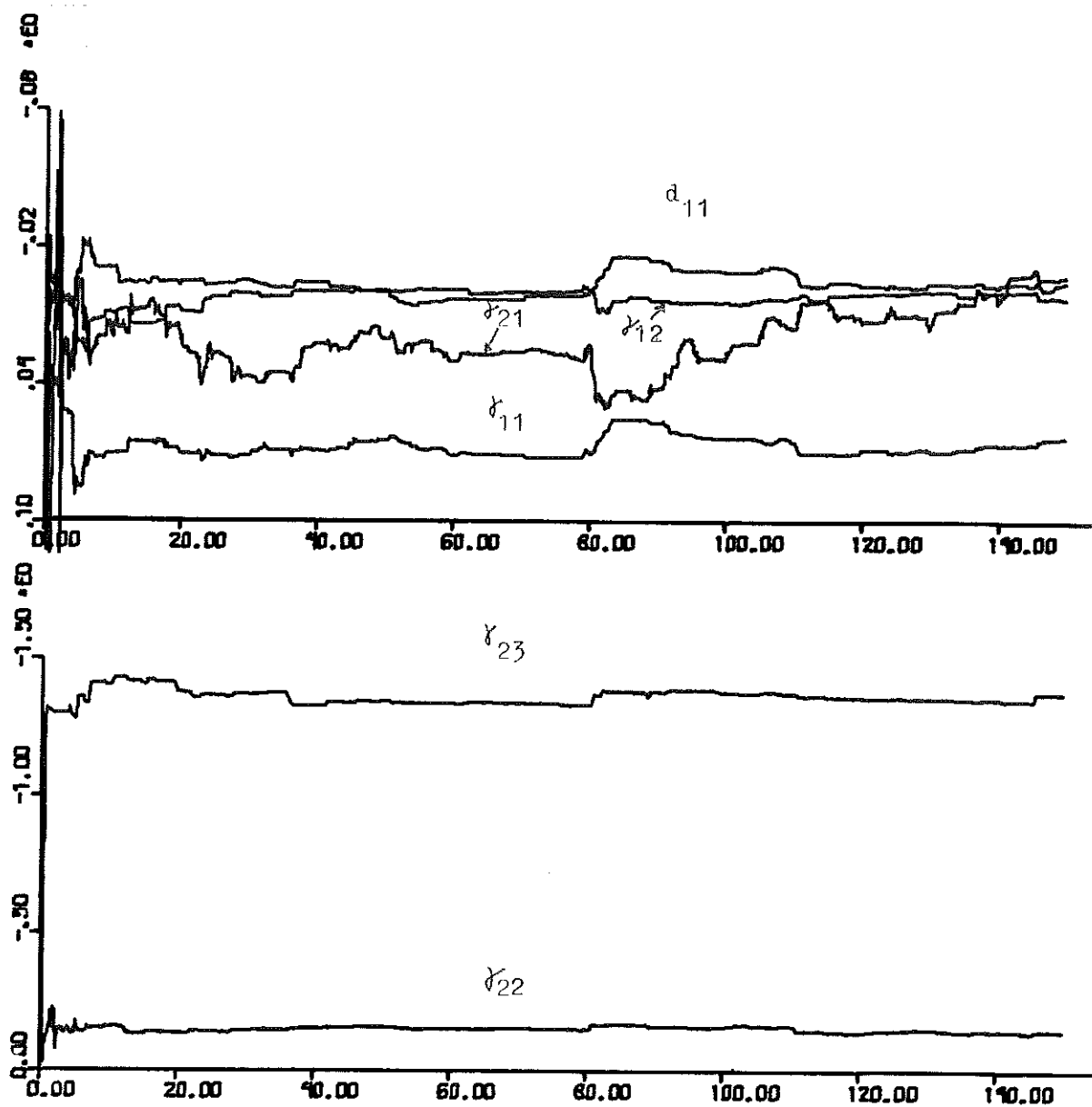


Fig. 7.3 Identifiering på RUN 10; D och Γ .

7.2 Identifiering på RUN 8

Identifieringen på detta experiment utfördes på samma sätt som på RUN 10. Endast de 2300 första värdena av experimentets 3648 användes, då signalerna efter c:a 2350 samplingsintervall hade ett beteende, som inte var fysikaliskt motiverat. Nedanstående tabell visar förlustfunktionernas värden för olika R_1 -matriser; $R_1 = r \cdot I$.

r	V_1	V_2	V_3
1.0	2.93	3.17	4.38
0.1	2.41	2.60	3.80
0.01	2.73	3.05	4.62

$r = 0.1$ är alltså ett lämpligt värde.

När identifieringen itererades, med startvärden från RUN 10 erhölls:

n	V_1	V_2	V_3
1	1.55	2.30	2.27
2	1.38	2.04	2.09
3	1.37	2.04	2.09

Följande värden på matriserna erhölls:

$$\phi = \begin{bmatrix} 0.965 & -0.020 & 0.020 \\ 0.474 & 0.244 & 0.240 \\ 0.220 & -0.225 & 0.940 \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = -0.11 \cdot 10^{-2}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.13 \cdot 10^{-2} & -0.34 \cdot 10^{-2} \\ -0.29 \cdot 10^{-2} & -0.13 \cdot 10^{-1} \\ 0 & -0.92 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$$

Skattade värden på standardavvikelserna:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 2.4 \cdot 10^{-2} \\ \lambda_2 &= 2.97 \cdot 10^{-2} \\ \lambda_3 &= 3.02 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

En plottning av parametrarna visas på sidorna 41 och 42. Parametrarna verkar till skillnad mot vad som antagits att vara tidskonstanta. Det stora antalet parametrar gör det dock besvärligt, att med bestämdhet avgöra, om någon eller några parametrar varierar med tiden, så kan t.ex. φ_{31} vara tidsberoende. De stora värdena på de tre första diagonalelementen i P-matrisen skulle kunna tyda på att φ -matrisen innehåller tidsberoende element, men detta kan också bero på att φ -elementen är flera storleksordningar större än elementen i D och Γ .

P-matrisen har följande utseende:

$$\begin{bmatrix} 12.58 & -16.88 & 3.75 & -0.124 & -0.141 & 0.267 \\ -16.88 & 27.61 & -9.48 & 0.024 & 0.077 & -0.515 \\ 3.75 & -9.48 & 6.57 & 0.028 & -0.004 & 0.315 \\ -0.124 & 0.024 & 0.028 & 0.174 & -0.067 & 0.000 \\ -0.141 & 0.077 & -0.004 & -0.067 & 0.171 & 0.002 \\ 0.267 & -0.515 & 0.315 & 0.000 & 0.002 & 0.118 \end{bmatrix}$$

Det är tänkbart, att processdynamiken antingen ändrar sig så långsamt, att man inte får någon signifikant ändring i parametervärdena, eller, vilket är mera troligt, att ändringen går så snabbt, att man med den använda algoritmen inte förmår följa parametrarna. Identifieringen på RUN 10 visar ju att konvergensen är mycket långsam.

En jämförelse mellan RUN 10 och RUN 8 visar på klara skillnader. Speciellt andra raden i ϕ , samt D och Γ är olika. Detta visar på en tydlig ändring av systemets dynamik. Vidare visar plottningen av parametrarna, att flera parametrar klart ändrar sitt beteende, när underkylningsrampen börjar efter 300 samplingsintervall.

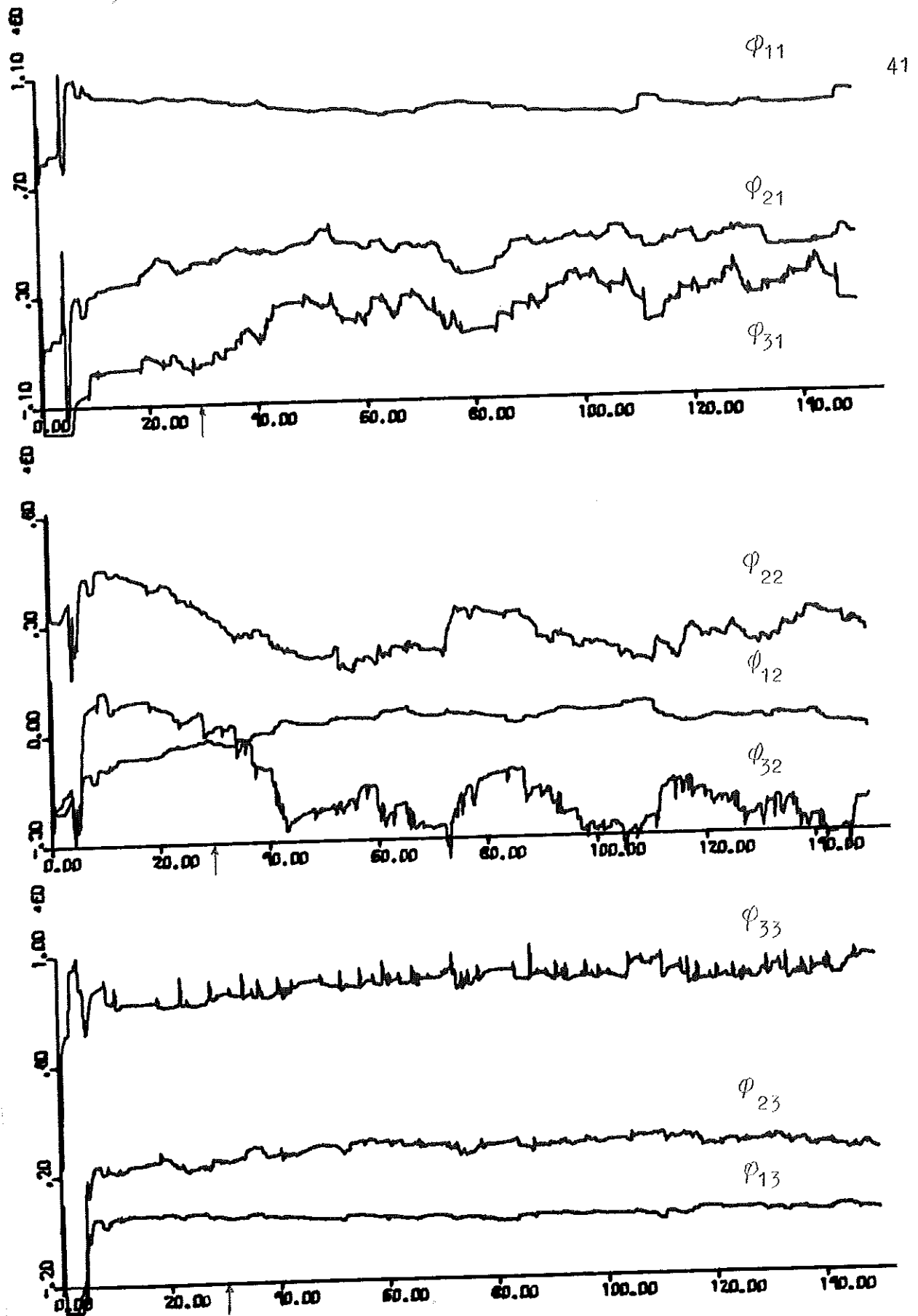


Fig. 7.4 Identifiering på RUN 8; ϕ -parametrar
Underkylningsrampen börjar vid pilen.

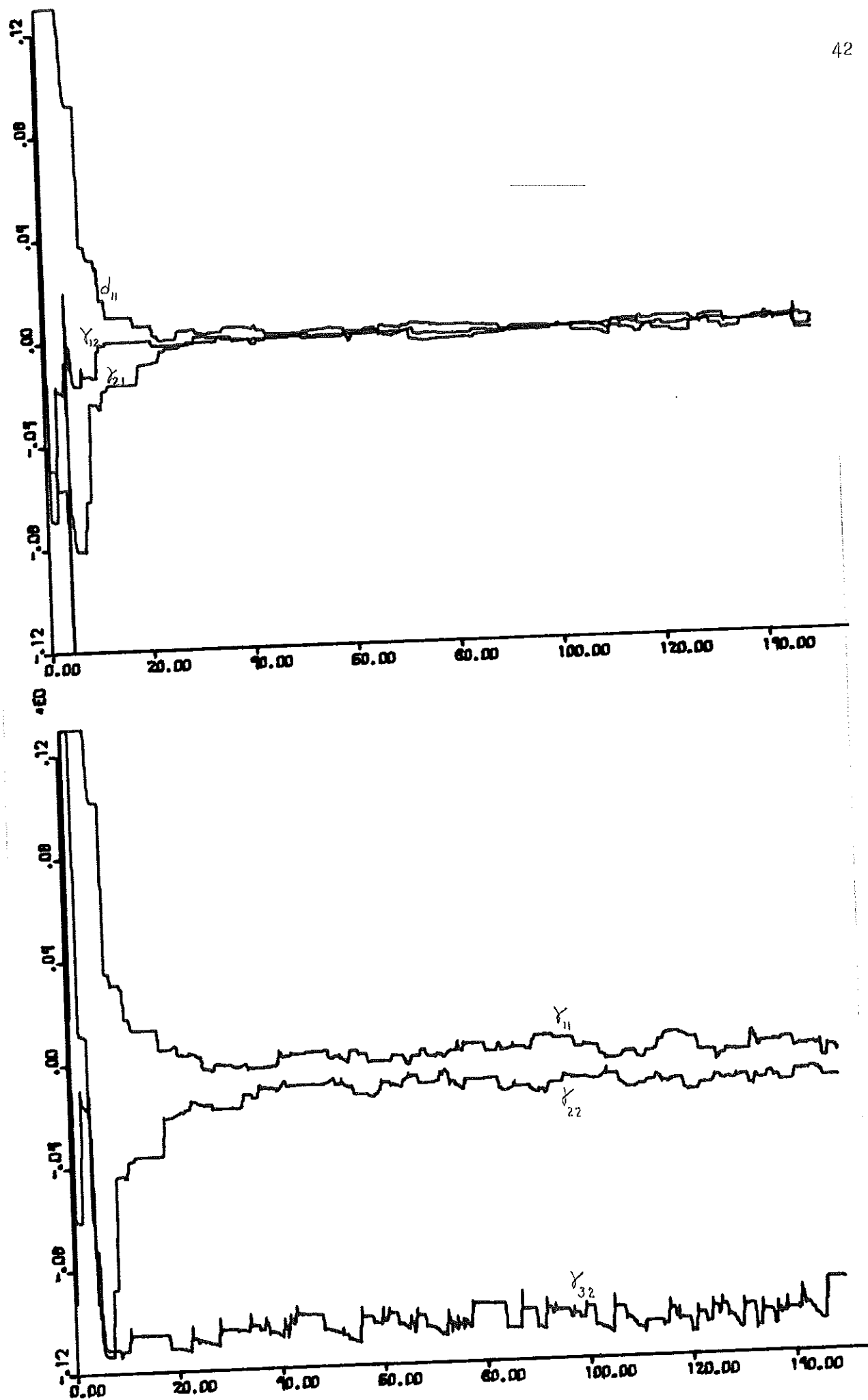


Fig. 7.5 Identifiering på RUN 8; D och Γ -parametrar.

8. Jämförelse med ML-identifiering

En Maximum-likelihood identifiering har utförts vid institutionen på experimentet RUN 10. ^[6] Därvid har man betraktat ett tryck som utsignal, samt övriga tryck och ROD samt VB 282 som insignaler. Den, för en jämförelse med här uppnådda resultat, intressanta strukturen är då följande:

$$y_1(t+1) + a_1 y_1(t) = b_{11} y_2(t) + b_{12} y_3(t) + b_{13} u_1(t) + b_{14} u_2(t) + \lambda(e(t+1) + c_1 e(t))$$

Följande resultat har erhållits, vid identifiering på de 900 första punkterna i RUN 10:

$$p_1(t+1) = 0.982 p_1(t) - 3.22 \cdot 10^{-4} p_2(t) + 1.27 \cdot 10^{-3} p_3(t) - 5.65 \cdot 10^{-2} u_2(t) + 2.75 \cdot 10^{-2} u_1(t) + 1.17 \cdot 10^{-4} (e_1(t+1) + 0.48 e_1(t))$$

$$p_2(t+1) = -5.8 \cdot 10^{-3} p_1(t) + 0.905 p_2(t) + 2.16 \cdot 10^{-4} p_3(t) + 2.26 \cdot 10^{-2} u_1(t) + 0.22 u_2(t) + 8.72 \cdot 10^{-4} e_2(t+1)$$

$$p_3(t+1) = -2.18 \cdot 10^{-2} p_1(t) + \underline{1.4 \cdot 10^{-4}} p_2(t) + 0.741 p_3(t) + 3.72 \cdot 10^{-1} u_2(t) + \underline{3.54 \cdot 10^{-2}} u_1(t) + 5.14 \cdot 10^{-4} (e_3(t+1) + 0.693 e_3(t))$$

Understrukna värden är ej signifikant skilda från noll.

Dessa värden är de bästa, som kan uppnås med den antagna strukturen. Preliminära resultat visar dock att man kan uppnå väsentliga förbättringar, dels genom att använda en högre ordningens modell, men också genom att införa flera variabler. Så tycks t.ex. den nukleära effekten vara väsentlig för att kunna beskriva dynamiken. Det är vidare sannolikt att flera parametrar är lika med noll.

En jämförelse med resultatet på sidan 33 visar att överensstämelsen utom när det gäller diagonalelementen i ϕ -matrisen och värdena på λ inte är särskilt stor. Detta visar den stora osäkerheten i resultaten. En bidragande orsak till skillnaderna kan vara att olika delar av mätserien utnyttjats vid identifieringarna. Man ser vidare, att förutsättningen om att bruset är vitt, som har gjorts här, är felaktig, åtminstone när det gäller ekvationerna 1 och 3.

En identifiering på experimentet RUN 11, som utfördes under samma betingelser som RUN 10, har gett följande resultat; data 1-1000 har använts.

$$p_1(t+1) = 0.956p_1(t) + 0.033p_2(t) + 0.0054p_3(t) + 0.127 \cdot 10^{-2}u_1(t+1) + 0.562 \cdot 10^{-2}u_1(t)$$

Här råder alltså större överensstämmelse med 1:a raden i ϕ . Direkttermens värde är dock skilt från vad här erhållits. Det är dock möjligt att denna term skall vara noll.

9. Resultatsammanfattning

De erhållna resultaten är, som föregående avsnitt visar, behäftade med stora osäkerheter. Den enkla strukturen hos den antagna modellen gör det svårt, att tolka resultaten, då det fysikaliska systemet är mycket komplicerat. Det är troligt, att bättre resultat kan uppnås, genom att införa ytterligare någon eller några tillståndsvariabler, samt genom att antaga en annorlunda struktur hos modellen. Vidare visar ML-identifieringarna, att antagandet att bruset är vitt innebär en grov approximation. Det är också tänkbart, att några av elementen i ϕ och Γ är lika med noll, samt att direkttermens inverkan helt kan försummas. Man kan inte heller utesluta, att parametrarna är tidsberoende, detta gäller särskilt RUN 8.

De erhållna modellerna är följande, där utsignalerna utgörs av trycken i respektive primär-, sekundär- och tertiärkretsen, samt insignalerna av styrstavarnas läge respektive ångventilen VB 282.

RUN 10

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 0.926 & 0.024 & 0.030 \\ 0.152 & 0.832 & 0.030 \\ 0.120 & 0.208 & 0.672 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} -0.3 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(t+1) +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0.79 \cdot 10^{-4} & 0.18 \cdot 10^{-6} \\ -0.19 \cdot 10^{-4} & -0.22 \cdot 10^{-3} \\ 0 & -0.14 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix} u(t)$$

$$\lambda_1 = 8.9 \cdot 10^{-5}$$

$$\lambda_2 = 3.7 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_3 = 5.6 \cdot 10^{-4}$$

RUN 8

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 0.965 & -0.020 & 0.020 \\ 0.474 & 0.244 & 0.240 \\ 0.226 & -0.225 & 0.940 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} -0.11 \cdot 10^{-2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(t+1) +$$
$$+ \begin{bmatrix} 0.13 \cdot 10^{-2} & -0.34 \cdot 10^{-2} \\ -0.29 \cdot 10^{-2} & -0.13 \cdot 10^{-1} \\ 0 & -0.92 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix} u(t)$$

$$\lambda_1 = 2.3 \cdot 10^{-2}$$

$$\lambda_2 = 2.97 \cdot 10^{-2}$$

$$\lambda_3 = 3.02 \cdot 10^{-2}$$

10. Referenser

1. Carlsson S., "Maximum Likelihood identifiering av reaktordynamik från flervariabla experiment", Report RE-111 1972
Lund Institute of Technology, Division of Automatic Control.
2. Klöver L., Olsson L., " Identifiering av Haldenreaktors dynamik med maximum likelihood metodik", Report RE-65 1969
Lund Institute of Technology, Division of Automatic Control.
3. Olsson G., "MLH Identification of some loops of the Halden Boiling Water Reactor", Report 7207 (B) Div. of Autom. Control, Lund Inst. of Techn., Lund 1972
4. Wieslander J., "Real Time Identification, Part I, Report 6908
Div. of Autom. Control, Lund Inst. of Techn., Lund 1969
5. Wieslander J., Real Time Identification, Part II, Report 7111
Div. of Autom. Control, Lund Inst. of Techn., Lund 1971
6. Olsson G, Opublicerade resultat av Haldenmätningar

Lagring av data på band

De intressanta signalerna från RUN 10 fanns överförda till ett band (46, Band S.C.), där varje variabel är lagrad i en särskild fil. Data från RUN 8 finns lagrat, tillsammans med data från andra experiment på band 472, HALD 3. Hela bandet är en enda fil med data lagrade mätpunktsvis. Sammanlagt är 34⁶ variabler registrerade. Den första variabeln anger numret på experimentet. De intressanta signalerna är variablerna nummer 5 (P13), 7 (P61), 9(P62), 34 (VB282), 35 (ROD), dessa jämte den nukleära effekten C10 (variabel nummer 2) överfördes till band 46, där de lagrades i filerna 36- 41. Program som överför data från band 472 till band 46 se nästa sida.

V FOR MAIN

UNIVAC 1108 FORTRAN V LEVEL 2206 0024 (EXEC8 LEVEL E1201-0009)

THIS COMPILATION WAS DONE ON 22 AUG 72 AT 08:29:53

MAIN PROGRAM

STORAGE USED: CODE(1) 000262; DATA(0) 062002; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

```

0003  NTRAN
0004  NRDU$
0005  NI01$
0006  NI02$
0007  NWDU$
0010  NREW$
0011  NWBU$
0012  NWEF$
0013  NSTOP$

```

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

```

0000  061754 1F          0000  061755 100F          0001  000016 112G          0001
0001  000246 20L        0001  000201 204G          0001  000201 206G          0001
0001  000027 3L         0001  000006 4L           0001  000111 40L           0001
0001  000123 99L        0000  I 061751  I           0000  I 061744  IN           0000
0000  R 061745 S1       0000  R 061746 S2           0000  R 061747 S3           0000
0000  R 000044 Z

```

```

00101  1*          DIMENSION X(36),Z(7,3648)
00103  2*          IN=1
00104  3*          S1=0,
00105  4*          S2=0,
00106  5*          S3=0,
00107  6*          S4=0,
00110  7*          4 READ(2,1,ERR=20,END=5) (X(I),I=1,36)
00116  8*          IF(X(1),LT,7,5) GO TO 4
00120  9*          3 READ(2,1,ERR=20,END=5) (X(I),I=1,36)
00126  10*         Z(1,IN)=X(5)
00127  11*         Z(2,IN)=X(7)
00130  12*         Z(3,IN)=X(9)
00131  13*         Z(4,IN)=X(34)
00132  14*         Z(5,IN)=X(35)
00133  15*         Z(6,IN)=X(2)
00134  16*         Z(7,IN)=X(1)
00135  17*         S1=S1+X(5)
00136  18*         S2=S2+X(7)
00137  19*         S3=S3+X(9)
00140  20*         S4=S4+X(2)
00141  21*         IF(IN=100) 30,30,40
00144  22*         30 WRITE(6,100) X(33),X(34),X(35)
00151  23*         40 IN=IN+1
00152  24*         IF(IN=3648)5,5,99
00155  25*         5 IF(X(1)=8,5)3,99,99
00160  26*         99 S1=S1/3648,
00161  27*         S2=S2/3648,
00162  28*         S3=S3/3648,
00163  29*         S4=S4/3648,

```

```

00164 30* WRITE(6,100) S1,S2,S3,S4
00172 31* DO 50 I=1,3648
00175 32* Z(1,I)=(Z(1,I)-S1)/S1
00176 33* Z(2,I)=(Z(2,I)-S2)/S2
00177 34* Z(3,I)=(Z(3,I)-S3)/S3
00200 35* 50 Z(6,I)=(Z(6,I)-S4)/S4
00202 36* WRITE(6,100)((Z(I,J),J=1,7),J=1,100)
00213 37* REWIND 2
00214 38* REWIND 3
00215 39* CALL NTRAN(3,8,35,22)
00216 40* DO 10 I=1,6
00221 41* WRITE(3) (Z(I,N),N=1,3648)
00227 42* 10 END FILE 3
00231 43* REWIND 3
00232 44* GO TO 7
00233 45* 20 WRITE(6,100) X(1),X(2)
00237 46* GO TO 4
00240 47* 1 FORMAT(22A6)
00241 48* 100 FORMAT(1H ,7F12.5)
00242 49* 7 STOP
00243 50* END

```

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

VNW ASM,* NININS
ASSEMBLED BY UNIVAC 1108 EXEC II ASSEMBLER 2404-0009C
THIS ASSEMBLY WAS DONE ON 22 AUG 72 AT 08:29:55
BLOCK 2,22,2200 2

VN ASM,* NOTINS
ASSEMBLED BY UNIVAC 1108 EXEC II ASSEMBLER 2404-0009C
THIS ASSEMBLY WAS DONE ON 22 AUG 72 AT 08:29:59

VN ASM,* NRWNS
ASSEMBLED BY UNIVAC 1108 EXEC II ASSEMBLER 2404-0009C
THIS ASSEMBLY WAS DONE ON 22 AUG 72 AT 08:30:03

FOR, IS MAIN
 FOR SIOA-11/08/72-10;15:52 (,0)

MAIN PROGRAM

STORAGE USED: CODE(1) 000664; DATA(0) 044321; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 NTRAN
 0004 KALID
 0005 NINTRS
 0006 HRDUS
 0007 NI02\$
 0010 NREWS
 0011 NRBU\$
 0012 NI01\$
 0013 NWDUS
 0014 NSTOPS

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0001	000026	1126	0001	000045	121G	0001	000064	130G	0001
0000	044206	160F	0001	000140	161G	0000	044211	170F	0001
0000	044220	205F	0000	044224	206F	0000	044230	207F	0000
0001	000240	223G	0001	000241	226G	0001	000256	241G	0001
0001	000305	263G	0001	000317	271G	0001	000331	277G	0001
0001	000343	305G	0000	044237	310F	0001	000355	313G	0000
0001	000374	326G	0000	044244	330F	0001	000402	335G	0000
0000	044253	360F	0000	044255	370F	0000	044257	380F	0001
0001	000543	400G	0001	000544	402G	0000	044264	410F	0000 R
0000 R	044205	DEN0H3	0000 R	000121	F11	0000 R	044132	F12	0000 R
0000 I	044166	J	0000 I	044163	K	0000 I	044174	M	0000 I
0000 R	000165	P1	0000 R	000306	P2	0000 R	000427	P3	0000 R
0000 R	044202	RES2	0000 R	044204	RES3	0000 R	044165	RR	0000 R
0000 R	044011	R3	0000 R	044170	SUM	0000 R	044156	S1	0000 R
0000 R	044161	S4	0000 R	044162	S5	0000 R	000132	T1	0000 R
0000 R	000550	U1	0000 R	007570	U2	0000 R	044171	V1	0000 R
0000 R	044175	YY1	0000 R	044176	YY2	0000 R	044177	YY3	0000 R
0000 R	034650	Y3							

0101 1* DIMENSION R1(9,9),F11(9),T1(9),T2(9),T3(9),P1(9,9),P2(9,9)
 0101 2* *P3(9,9),U1(3600),U2(3600),Y1(3600),Y2(3600),Y3(3600)
 0103 3* DIMENSION R2(9,9),R3(9,9),F12(9),F13(9)
 0104 4* READ(5,300)NS
 0107 5* REWIND 3
 0110 6* READ(3)(U2(I),I=1,NS)
 0116 7* CALL NTRAN(2,8,1,22)
 0117 8* READ(3)(U1(I),I=1,NS)
 0125 9* CALL NTRAN(2,8,2,22)
 0126 10* READ(3)(Y1(I),I=1,NS)
 0134 11* CALL NTRAN(2,8,1,22)
 0135 12* READ(3)(Y2(I),I=1,NS)
 0143 13* CALL NTRAN(2,8,1,22)
 0144 14* READ(3)(Y3(I),I=1,NS)
 0152 15* REWIND 3
 0153 16* S1=0.
 0154 17* S2=0.
 0155 18* S3=0.

```

00156      19*      S4=0.
00157      20*      S5=0.
00160      21*      DO 18 I=1100,NS
00163      22*      S1=S1+U1(I)
00164      23*      S2=S2+U2(I)
00165      24*      S3=S3+Y1(I)
00166      25*      S4=S4+Y2(I)
00167      26*      18 S5=S5+Y3(I)
00171      27*      S1=S1/2500.
00172      28*      S2=S2/2500.
00173      29*      S3=S3/2500.
00174      30*      S4=S4/2500.
00175      31*      S5=S5/2500.
00176      32*      DO 19 I=1100,NS
00201      33*      U1(I)=U1(I)-S1
00202      34*      U2(I)=U2(I)-S2
00203      35*      Y1(I)=(Y1(I)-S3)*1000.
00204      36*      Y2(I)=(Y2(I)-S4)*1000.
00205      37*      19 Y3(I)=(Y3(I)-S5)*1000.
00207      38*      DO 50 K=1,2
00212      39*      READ(5,400) R,RR
00216      40*      WRITE(6,410) R,RR
00222      41*      DO 16 I=1,6
00225      42*      DO 16 J=1,6
00230      43*      P1(I,J)=0.
00231      44*      P2(I,J)=0.
00232      45*      P3(I,J)=0.
00233      46*      R1(I,J)=0.
00234      47*      R2(I,J)=0.
00235      48*      16 R3(I,J)=0.
00240      49*      DO 17 I=1,6
00243      50*      P1(I,I)=10.
00244      51*      P2(I,I)=10.
00245      52*      P3(I,I)=10.
00246      53*      R1(I,I)=0.001
00247      54*      R2(I,I)=R
00250      55*      17 R3(I,I)=R
00252      56*      DO 10 I=4,6
00255      57*      R1(I,I)=RR
00256      58*      R2(I,I)=RR
00257      59*      10 R3(I,I)=RR
00261      60*      READ(5,340)(T1(I),I=1,6)
00267      61*      READ(5,340)(T2(I),I=1,5)
00275      62*      READ(5,340)(T3(I),I=1,4)
00303      63*      WRITE(6,350)(T1(I),I=1,6)
00311      64*      WRITE(6,350)(T2(I),I=1,5)
00317      65*      WRITE(6,350)(T3(I),I=1,4)
00325      66*      DO 50 NR=1,2
00330      67*      SUM=0.
00331      68*      V1=0.
00332      69*      V2=0.
00333      70*      V3=0.
00334      71*      DO 20 M=1101,3500
00337      72*      F11(M)=Y1(M-1)
00340      73*      F11(2)=Y2(M-1)
00341      74*      F11(3)=Y3(M-1)
00342      75*      F11(4)=U1(M+1)
00343      76*      F11(5)=U1(M)
00344      77*      F11(6)=U2(M)
00345      78*      F12(1)=Y1(M-1)
00346      79*      F12(2)=Y2(M-1)
00347      80*      F12(3)=Y3(M-1)
00350      81*      F12(4)=U1(M)
00351      82*      F12(5)=U2(M)

```

```

00352      83*      F13(1)=Y1(M-1)
00353      84*      F13(2)=Y2(M-1)
00354      85*      F13(3)=Y3(M-1)
00355      86*      F13(4)=Y2(M)
00356      87*      YY1=Y1(M)
00357      88*      YY2=Y2(M)
00360      89*      YY3=Y3(M)
00361      90*      CALL KALID(T1,P1,F11,YY1,6,9,R1,RES1,DENOM1)
00362      91*      CALL KALID(T2,P2,F12,YY2,5,9,R2,RES2,DENOM2)
00363      92*      CALL KALID(T3,P3,F13,YY3,4,9,R3,RES3,DENOM3)
00364      93*      RES1=RES1**2
00365      94*      RES2=RES2**2
00366      95*      RES3=RES3**2
00367      96*      SUM=SUM+RES1+RES2+RES3
00370      97*      V1=V1+RES1
00371      98*      V2=V2+RES2
00372      99*      V3=V3+RES3
00373     100*      IF(M/1000*1000.EQ.M) GO TO 30
00375     101*      GO TO 40
00376     102*      30 WRITE(6,360)((P1(I,J),J=1,9),I=1,9)
00407     103*      40 CONTINUE
00410     104*      IF(M/100*100.EQ.M) GO TO 26
00412     105*      GO TO 20
00413     106*      26 WRITE(6,208)M
00416     107*      27 WRITE(6,205)T1(1),T1(2),T1(3),T2(1),T2(2),T2(3),T3(1),T3(2)
00431     108*      WRITE(6,206) T1(4)
00434     109*      WRITE(6,207) T1(5),T1(6),T2(4),T2(5),T3(4)
00443     110*      20 CONTINUE
00445     111*      WRITE(6,310)NS
00450     112*      WRITE(6,160)SUM
00453     113*      WRITE(6,170)V1,V2,V3
00460     114*      50 CONTINUE
00463     115*      160 FORMAT(1H0,2HV=,F9.3)
00464     116*      170 FORMAT(1H0,3HV1=,F8.3//3HV2=,F8.3//3HV3=,F8.3)
00465     117*      205 FORMAT(1H ,2HF1,5X,9F10.3)
00466     118*      206 FORMAT(1H ,2HD ,5X,9E10.3)
00467     119*      207 FORMAT(1H ,2HG ,5X,9E10.3)
00470     120*      208 FORMAT(1H ,14)
00471     121*      300 FORMAT(14)
00472     122*      310 FORMAT(1H0,4HNS= ,14)
00473     123*      320 FORMAT(1H ,5F10.5)
00474     124*      330 FORMAT(1H1,3HRI=,F8.2)
00475     125*      340 FORMAT(6F10.5)
00476     126*      350 FORMAT(1H ,6F10.5)
00477     127*      360 FORMAT(1H ,9F10.3)
00500     128*      370 FORMAT(F10.5)
00501     129*      380 FORMAT(1H ,3HRI=,F7.5)
00502     130*      400 FORMAT(2F10.6)
00503     131*      410 FORMAT(1H ,2HR=,F10.6,5X,3HRR=,F10.6)
00504     132*      STOP
00505     133*      END

```

END OF COMPILATION:

NO DIAGNOSTICS.

FOR MODEL
 IVAC 1108 FORTRAN V LEVEL 2206 0024 (EXEC8 LEVEL E1201-0009)
 THIS COMPILATION WAS DONE ON 05 JUL 72 AT 09:38:04

SUBROUTINE MODEL ENTRY POINT 000236

STORAGE USED: CODE(1) 000272; DATA(0) 000113; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 NODI
 0004 NERR3\$

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0001	000050	1056	0001	000053	1106	0001	000055	1146	0001
0001	000132	1346	0001	000142	1406	0001	000204	1476	0000 R
0000	I 000036	I	0000	000045	INJP\$	0000	I 000037	J	0000 I

```

0101 1* SUBROUTINE MODEL(FI,GP,D,N,Y1,U,ALAM,KK)
0103 2* DIMENSION FI(N,N),GP(N,N),G(5,5),D(N,N),Y1(N),Y2(5),U(N,2)
0104 3* DO 10 I=1,N
0107 4* DO 10 J=1,N
0112 5* G(I,J)=0.
0113 6* DO 10 K=1,N
0116 7* 10 G(I,J)=G(I,J)+FI(I,K)*D(K,J)
0122 8* DO 11 I=1,N
0125 9* DO 11 J=1,N
0130 10* 11 G(I,J)=GP(I,J)-G(I,J)
0133 11* DO 12 I=1,N
0136 12* Y2(I)=0.
0137 13* DO 12 J=1,N
0142 14* CALL NODI(KK,E)
0143 15* 12 Y2(I)=Y2(I)+FI(I,J)*Y1(J)+D(I,J)*U(J,1)+G(I,J)*U(J,2)+E*ALAM
0146 16* DO 13 I=1,N
0151 17* 13 Y1(I)=Y2(I)
0153 18* RETURN
0154 19* END

```

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.