

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5241)/1-080/(1980)

FARTYGSSTYRNING VID SJÖGÅNG

ANDERS FREIJ
SÖREN ROMARE

INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
OKTOBER 1980

Organization LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY Department of Automatic Control Box 725 S-220 07 Lund 7 Sweden	Document name Master thesis	
	Date of issue October 1980	
	CODEN: LUTFD2/(TFRT-5241)/1-80/(1980)	
Author(s) Anders Freij Sören Romare	Supervisor: K J Åström	
Title and subtitle Fartygsstyrning vid sjögång (Automatic steering of ships in heavy seas)		
A4 A5		
Abstract <p>This paper deals with automatic steering of ships under the influence of disturbance from waves. The disturbance has been of two different types, a sinusoidal wave and a disturbance in the yaw rate. We have used both conventional state feedback regulators and adaptive regulators based on least square estimation and minimum variance control. In particular, we have investigated the behavior of the adaptive regulator in quarterly seas. Different ways to improve the performance of the regulators have been tested. Additional proposals for improvements which are not yet tested, have also been given.</p>		
A4 A5		
Key words		
Classification system and/or index terms (if any)		
Supplementary bibliographical information		Language Swedish
ISSN and key title		ISBN
Recipient's notes	Number of pages 80	Price
	Security classification	

DOKUMENTATABLAD enl SIS 61 41 21

Distribution by (name and address)

Sammanfattning:

Styrning av fartyg med olika typer av regulatorer under inverkan av störningar från vågor behandlas. Störningarna har varit av två slag, dels rent sinusformade vågor dels störningar i form av girhastighetsstörningar. Vi har studerat fartyg styrda med konventionella tillståndsregulatorer och adaptiva regulatorer baserade på minsta kvadrat-skattningar och minimal varians-styrning. Speciellt har de adaptiva regulatorernas uppförande vid akterlig sjö studerats. Det är svårt att styra under dessa förhållanden då vågorna sett från båten har låg frekvens. Olika förslag till förbättringar har prövats och ytterligare oprövade förslag har lagts fram.

EXAMENSARBETE

rörande

FARTYGSSTYRNING
vid sjögång

av

ANDERS FREIJ

och

SÖREN ROMARE

oktober 1980

FARTYGSSTYRNING

1. Inledning

1.1 Disposition

Syftet med examensarbetet har varit att undersöka beteendet hos olika regulatorer för styrning av fartyg, under inverkan av havsvågor. Arbetet har koncentrerats kring adaptiva regulatorers uppförande under inverkan av akterfrån inkommande sjö. Dessa vågor har sett från båten låg frekvens och är besvärliga att styra i.

I kapitel 2 presenteras ett antal matematiska modeller av den båt, Sea Stratus, som välvilligt ställt sina egenskaper till vårt förfogande. Kapitel 3 behandlar de konventionella regulatorer vi använt och deras förmåga att styra båtarna. Dessa regulatorer bygger på tillståndsåterkoppling. Återkoppling från samtliga tillstånd kräver en hel del mätutrustning varför man ofta föredrar att enbart mäta kursen och ur denna rekonstruera övriga tillstånd med hjälp av Kalmanfilter. Försöken med Kalmanfilter behandlas i kapitel 4. Efter detta är vi mogna att pröva adaptiva regulatorer. I kapitel 5 presenteras resultat, och vi diskuterar också de problem som uppstår vid lågfrekvent vågstörning. Kapitlet innehåller dessutom ett förslag till fortsatt arbete. En sammanfattning av resultaten återfinns slutligen i kapitel 6.

1.2 Tack

Vi vill här framföra ett tack till alla vid institutionen för Reglerteknik, då framförallt till K.J. Åström som varit en inspirerande handledare som gärna ställt upp med givande uppslagsändar i våra många problemsituationer och till Leif Andersson som hjälpt oss i kontakten med datorerna.

FARTYGSSTYRNING

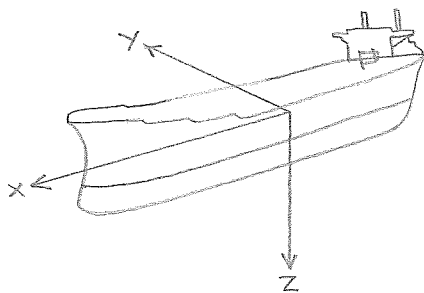
2. Matematiska modeller

För att genomföra undersökningen behövs matematiska modeller som beskriver fartygsdynamiken och störningarna. I detta avsnitt ges en sammanfattning av de modeller som använts.

Utgående från [1] har vi tagit fram dels en båtmodell med tre tillstånd och dels metoder att generera vågstörningar, både sinusformade vågor och rena girhastighetsstörningar. En förenklad modell utan störningar, avsedd att användas vid utprovning av nya regulatorer, finns också med bland våra modeller. För samma båt har vi från modellen med tre tillstånd härlett en Nomoto-modell (två tillstånd), inkluderande generering av ovan nämnda störningar. Vi har även möjlighet att prova regulatorer på en modell som dessutom innehåller vind- och strömstörningar. På grund av programvarumässiga begränsningar kommer modellen inte att användas. Den finns härledd i [1] och kommer inte att diskuteras i det följande.

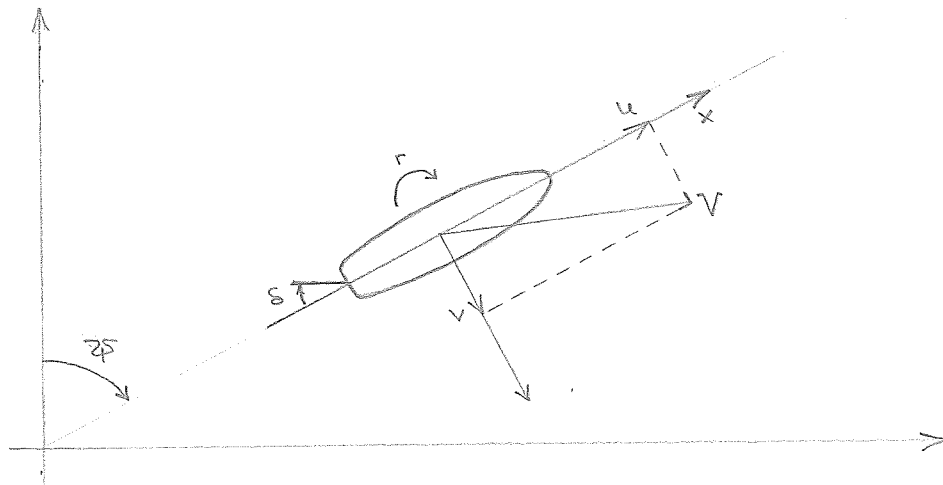
2.1 Beteckningar

Vi inför ett koordinatsystem som är fixerat vid båten enligt figur 2.1. Båtens totala hastighet betecknas V och hastighetens projektioner på x - resp y -axlarna med u resp v . Girhastigheten betecknas r , kursvinkel ψ och rodervinkeln δ . Se figur 2.2. De hydrodynamiska krafternas komponenter längs x - resp y -axlarna kallas X resp Y och z -komponenten av det hydrodynamiska momentet betecknas N . Talet m betecknar båtens massa, I_z tröghetsmomentet runt z -axeln och x_G är masscentrums x -koordinat.



figur 2.1

FARTYGSSTYRNING



figur 2.2

2.2 Sinusformade vågor

Vi vill generera störningar i form av sinusformade vågor och vi vill ha möjlighet att variera utbredningsriktning och storlek. Vi betecknar utbredningsriktningen γ_w , våghöjden (dubbla amplituden) h och periodtiden T_w . Vi inför vinkeln χ som är utbredningsriktningen i förhållande till fartyget och det gäller att

$$\chi = \pi - (\gamma_w - \psi) \quad (2.1)$$

enligt figur 2.3.

Nu införes ω_e som är den frekvens med vilken vågorna träffar fartyget. Den ges av

$$\omega_e = \omega - \sigma u \cos \chi + \sigma v \sin \chi \quad (2.2)$$

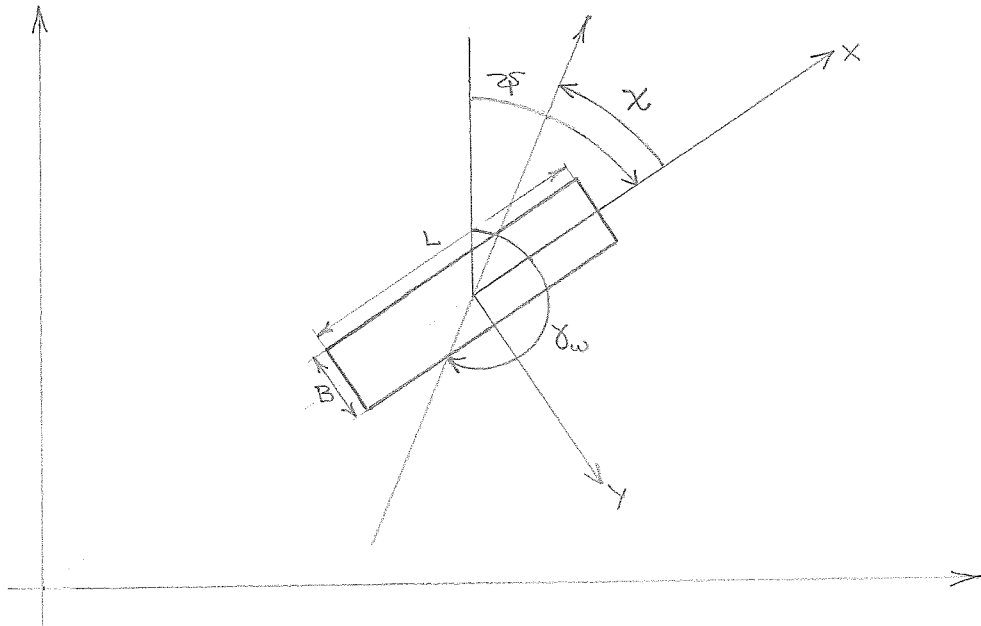
där vågtalet $\sigma = 4\pi^2 / (gT_w^2)$ och (2.3)

$$\text{frekvensen } \omega = 2\pi / T_w \quad (2.4)$$

Man kan härleda uttryck för vågornas form, lutning och tryck (ξ , s , p). Under förutsättning att fartyget kan betraktas som ett rätblock kan följande approximativa uttryck härledas för de krafter och moment vågorna ger upphov till. Se [1].

$$X_{wI} = 2aW (\sin b \sin c / c) \cdot s(t) \quad (2.5)$$

FARTYGSSTYRNING



Figur 2.3

$$Y_{wI} = -2aL (\sin b \sin c / b) \cdot s(t) \quad (2.6)$$

$$N_{wI} = a\sigma(W^2 \sin b (c \cos c - \sin c) / c^2 - L^2 \sin c (b \cos b - \sin b) / b^2) \cdot \xi(t) \quad (2.7)$$

där

$$a = \rho g (1 - e^{-\sigma T}) / \sigma^2 \quad (2.8)$$

$$b = \sigma L / 2 \cos x \quad (2.9)$$

$$c = \sigma W / 2 \sin x \quad (2.10)$$

$$s(t) = \sigma h / 2 \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

$$\xi(t) = h / 2 \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

Storleken på vågorna karakteriseras av h och T_w , vars värden ges som en funktion av vindhastigheten. Följande empiriska samband gäller då $0 \leq v_T \leq 20$ m/s:

$$h(v_T) = 0.015v_T^2 + 1.5 \quad (2.13)$$

$$T_w(v_T) = -0.0014v_T^3 + 0.042v_T^2 + 5.6 \quad (2.14)$$

FARTYGSSTYRNING

2.3 Girhastighetsstörningar

Ibland är man intresserad av att se vad som händer då störningen införes som ett moment. Förhållanden till havs, där man kan observera fluktuationer i vågstorlek, kan nämligen modelleras som momentstörningar. (Jfr det bland gamla sjömän kända talesättet "Var sjunde våg är stor".) Det anses att en momentstörning som kommer var 300:e sekund och varar 5 sekunder beskriver dessa fluktuationer. Motiverade av detta vill vi kunna generera också dylika störningar. Vi skriver därför vår störning, se figur 2.4, som

$$N_w = \begin{cases} N & \text{mod}(t, m_{\text{per}}) \geq m_{\text{dur}} - m_{\text{per}} \\ 0 & \text{per} \\ 0 & \text{f.ö.} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\text{där } N_w = I_z \cdot r_o \quad (2.16)$$

m_{per} är tiden mellan störningarna,
per

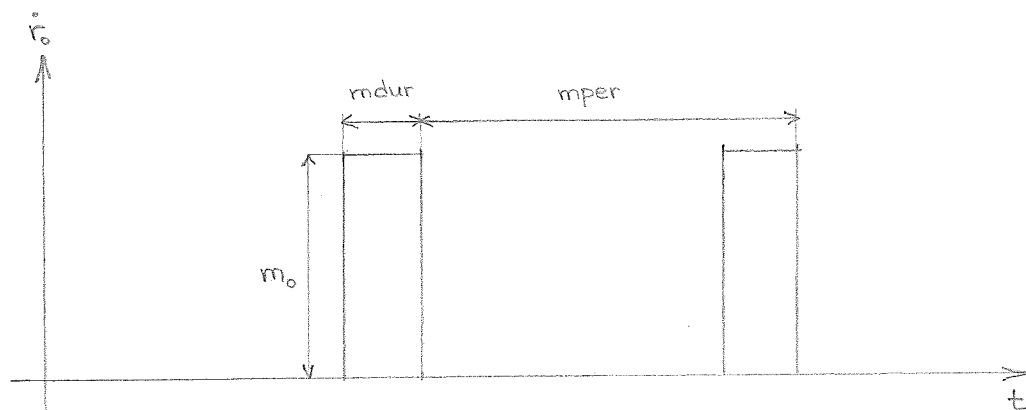
m_{dur} är störningarnas varaktighet,
dur

r_o är den mot störningen svarande giraccelerationen.

Genom att välja m_{per} tillräckligt stort kan vi få ett under önskad tid ostört system.

2.4 Modell med tre tillstånd

Båtens rörelse antas ske i ett plan. Rörelseekvationerna kommer från Newtons lag om rörelsemängdens och rörelsemängdsmomentets bevarande:



figur 2.4

FARTYGSSTYRNING

$$\begin{cases} m(u-v-r-x \cdot r^2) = X \\ m(v+u-R+x \cdot r) = Y \\ I_z \cdot r + m \cdot x \cdot (v+u \cdot r) = N \end{cases} \quad (2.17)$$

Genom antaganden om X , Y och N och genom att utnyttja symmetriegenskaper hos fartyg erhålles en tämligen komplicerad icke-linjär modell som kan studeras i [1].

I våra modeller använder vi fartygets längd, L , som längdenhet. Som tidsenhet använder vi den tid det tar för fartyget att förflytta sig sin egen längd dvs L/V . Massenheten är $\rho \cdot L^3/2$, där ρ är vattnets densitet. Storheter som är uttryckta i dessa enheter markeras med '. Ovan nämnda icke-linjära modell kan linjäriseras kring $v=r=\delta=0$ och $u=u_0$ och den linjära modellen ges av:

$$\begin{bmatrix} m' & -Y_{v'} & L(m' \cdot x' - Y_{v'}) & 0 \\ m' \cdot x' - N_{v'} & L(I_z' - N_{v'}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V/L \cdot Y' & V(Y' - m') & 0 \\ V/L \cdot N' & V(N' - m' \cdot x') & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V^2/L \cdot Y'_{\delta} \\ V^2/L \cdot N'_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (2.18)$$

Vi introducerar nu störningarna som finns beskrivna i föregående avsnitt. Newtons rörelseekvationer ser då ut så här.

$$\begin{cases} m(\ddot{u}-v \cdot r-x \cdot r^2) & = X + \bar{X} & \bar{X} = X^w(u,v,\psi) \\ m(\ddot{v}-u \cdot r+x \cdot r) & = Y + \bar{Y} & \bar{Y} = Y^w(u,v,\psi) \\ I_z \cdot \ddot{r} + m \cdot x \cdot (\ddot{v}+u \cdot r) & = N + \bar{N} & \bar{N} = N^w(u,v,\psi) \end{cases} \quad (2.19)$$

Den linjära modellen med störningar ges nu av:

FARTYGSSTYRNING

$$\begin{bmatrix} m' - Y_{\psi}' & L(m' - x' - Y_{\psi}') & 0 \\ m' - x' & L(I' - N_{\psi}') & 0 \\ 0 & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} V/L \cdot (Y' + \nabla') & V \cdot (Y' - m') & V^2/L \cdot \nabla' \\ V/L \cdot (N' + \bar{N}') & V \cdot (N' - m' - x') & V^2/L \cdot \bar{N}' \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} V^2/L \cdot Y' \\ V^2/L \cdot N' \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta + \begin{bmatrix} V^2/L \cdot \nabla' \\ V^2/L \cdot \bar{N}' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Enligt [1] kan man bortse från tvärhastigheten, v, då man betraktar vågstörningen. Sålunda kan vi sätta $\nabla = \bar{N} = 0$. I våra fortsatta beräkningar har vi även satt $\nabla = \bar{N} = 0$. ∇ , \bar{N} ges av

$$\begin{cases} \nabla = Y(u, 0, \psi) \\ \bar{N} = N_w(u, 0, \psi) \end{cases} \quad (2.21)$$

För den sinusformade vågstörningen fås ∇_0 och \bar{N}_0 genom att sätta in

$$\omega_e = \theta - \sigma u_0 \cos x \quad (2.22)$$

i stället för uttrycken (2.1), (2.3)-(2.14).

För momentstörningen kan vi skriva:

$$\begin{cases} \nabla = 0 \\ \bar{N} = N_w \end{cases} \quad (2.23)$$

där N_w ges av formlerna (2.15)-(2.16).

Genom lösning av systemet (2.20) fås nu den slutgiltiga tretillståndsmodellen:

FARTYGSSTYRNING

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V/L \cdot \bar{a}'_{11} & V \cdot \bar{a}'_{12} & 0 \\ V/L \cdot \bar{a}'_{21} & V/L \cdot \bar{a}'_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V^2/L \cdot \bar{b}'_{11} \\ V^2/L \cdot \bar{b}'_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta + \begin{bmatrix} V^2/L \cdot \bar{f}'_{11} & V^2/L \cdot \bar{f}'_{12} \\ V^2/L \cdot \bar{f}'_{21} & V^2/L \cdot \bar{f}'_{22} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}' \\ \bar{N}' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Uttrycken för koefficienterna i (2.24) framgår av listan på Simnon-programmet för modellen. Se Appendix A:1.

2.5 Nomoto-modellen

Med utgångspunkt från modellen med tre tillstånd (2.24) önskar vi härleda Nomoto-modellen, vars tillstånd är r och ψ . Vi börjar med att jämföra överföringsfunktionerna i de två modellerna. Enl [1] ges $G_{r\delta}$ för (2.24) av

$$G_{r\delta} = \frac{V^2/L \cdot \bar{b}'_{11} \cdot s^2 + V^3/L \cdot \bar{b}'_{12} \cdot s}{s^3 + V/L \cdot \bar{a}'_{11} \cdot s^2 + V^2/L \cdot \bar{a}'_{21} \cdot s + V^3/L \cdot \bar{a}'_{33}} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \text{med } \bar{a}'_1 &= -\bar{a}'_{11} - \bar{a}'_{22} \\ \bar{a}'_2 &= \bar{a}'_{11} \cdot \bar{a}'_{22} - \bar{a}'_{12} \cdot \bar{a}'_{21} \\ \bar{a}'_3 &= 0 \\ \bar{b}'_1 &= \bar{b}'_{21} \\ \bar{b}'_2 &= \bar{a}'_{21} \cdot \bar{b}'_{11} - \bar{a}'_{11} \cdot \bar{b}'_{21} \end{aligned}$$

Nomoto-modellens överföringsfunktion från δ till r ges av

$$G_{r\delta} = \frac{K_B}{s(s + 1/T)} \quad (2.26)$$

Identifiering av koefficienter ger

$$K_B = \frac{V^2 \cdot \bar{b}'_2}{L^2 \bar{a}'_1 \bar{b}'_2 - \bar{a}'_2 \bar{b}'_1} \quad (2.27)$$

$$T = \frac{L}{V} \begin{bmatrix} \bar{a}'_1 & \bar{b}'_1 \\ \bar{a}'_2 & \bar{b}'_2 \end{bmatrix}$$

Från överföringsfunktionen (2.26) kan vi härleda tillståndsformen av Nomoto-modellen:

$$\dot{r} + 1/T = K_B \delta \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_B \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (2.28)$$

Vid betraktande av (2.20) finner man, att störningstermerna kommer in i modellen på liknande sätt som insignalen. Vi kan därför skriva Nomoto-modellen med störningar på följande sätt:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_B \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta + \begin{bmatrix} K_F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

där K_F härleds ur variablerna i tretillståndsmodellen analogt med härledningen av K_B dvs

$$K_F = \frac{V^2 \cdot \bar{f}'_2}{L^2 \bar{a}'_1 \bar{f}'_2 - \bar{a}'_2 \bar{f}'_1} \quad (2.30)$$

$$\text{där } \bar{f}'_1 = \begin{bmatrix} \bar{f}'_{21} & \bar{f}'_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}' \\ \bar{n}' \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}'_2 = \begin{bmatrix} \bar{a}'_{21} (\bar{f}'_{11} \bar{f}'_{12}) - \bar{a}'_{11} (\bar{f}'_{21} \bar{f}'_{22}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}' \\ \bar{n}' \\ 0 \end{bmatrix}$$

En listning av Simnon-programmet för modellen finns i Appendix A:2.

2.6 Förenklad modell med tre tillstånd

Som vi tidigare nämnt är det bra att ha en mycket enkel båtmodell att göra de första testen av en ny regulator på. Modellen är, på tillståndsform:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & 0 \\ a'_{21} & a'_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (2.31)$$

och parametrarnas värden är

$$\begin{aligned} a'_{11} &= -0.6807 \\ a'_{12} &= -0.2814 \\ a'_{21} &= -1.392 \\ a'_{22} &= -2.01 \\ b'_1 &= 0.1691 \\ b'_2 &= -1.74 \end{aligned}$$

Dessa parametervärden ger en pol i höger halvplan och således är båten instabil. I Appendix A:3 finns det mot modellen svarande Simnon-programmet.

FARTYGSSTYRNING

3. Tillståndsåterkoppling

För att ha en bra och enkel referensregulator i vårt fortsatta arbete, har vi dimensionerat en regulator som utnyttjar optimal tillståndsåterkoppling på Nomoto-modellen, dvs återkoppling från kurs och girhastighet. Vi har konstruerat regulatorer för både kontinuerlig och tidsdiskret reglering. Regulatorerna har provats på Nomoto-modellen och resultat av dessa prov redovisas i det följande. Försök har gjorts att reglera modellen med tre tillstånd med denna regulator. Nedan jämför vi egenskaper hos denna regulator med den optimala återkopplingen från de tre tillstånden. Vi har också undersökt en återkoppling på Nomoto-modellen från enbart kurs, dimensionerad för en modell med ett tillstånd.

3.1 Kontinuerlig tillståndsåterkoppling

Vi antar i det följande att både kurs och girhastighet är mätbara och vill dimensionera en tillståndsåterkoppling för Nomoto-modellen (2.28). Som insignal till båten ska vi alltså välja

$$\delta = -k_1 r - k_2 \psi. \quad (3.1)$$

Återkopplingen skall vara optimal i den meningen att den ska minimera förlustfunktionen

$$J = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t (\psi^2 + \rho \delta^2) dt' \quad (3.2)$$

där vi valt straffet (ρ) på signalen lika med 0.1.

$L = (k_1 \quad k_2)$ ges av

$$L = Q_2^{-1} B^T S \quad (3.3)$$

där S ges av

$$\dot{S} = A^T S + SA + Q_1 - SBQ_2^{-1} B^T S \quad (3.4)$$

om förlustfunktionen är

$$J = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t (x^T Q_1 x + u^T Q_2 u) dt'. \quad (3.5)$$

Vi väljer den stationära lösningen av (3.4) och får därmed

FARTYGSSTYRNING

följande lösning, där $\alpha=1/T$

$$L = \left[\text{sign } K_B \cdot \left(\frac{\alpha}{k} \right)^2 + \frac{2}{|k|e} - \frac{\alpha}{k} \quad \frac{\text{sign } K}{e} B \right] \quad (3.6)$$

Simmon-programmet för den kontinuerliga tillståndsregulatorn finns i Appendix B:1.

Regulatorn har använts för att styra Nomoto-modellen. Dess förmåga att hantera antingen en ändring av referensvärdet för kursen, en girhastighetsstörning eller en störning genom sinusformade vågor framgår av de simuleringsresultat som presenteras i figur 3.1. Sinusvågorna har vi låtit komma från två olika vinklar, 70° resp 160° . De senare ger ett betydligt lägre värde på θ_e och det visar sig att denna

störning kräver betydligt större styrsignaler. I figur 3.1 finns kurs och rodevinkel för de olika fallen och för referensvärdesändringen har även en figur med referenskurs och verklig kurs tagits med. De högfrekventa roderutslag som syns i figur 3.1(d) kommer ej att ha någon inverkan på kursen. Regulatorn fungerar inte på önskvärt sätt, då man av en bra regulator kan kräva att högfrekventa störningar inte slår igenom på rodersignalen.

3.2 Diskret tillståndsåterkoppling

Vi önskar också härleda den diskreta motsvarigheten till tillståndsregulatorn ovan. Denna samplade variant behövs för att kunna implementera regulatoralgoritmen på de datorer, som ofta sköter styrningen av fartyg. I det diskreta fallet vill vi genom återkopplingen

$$\delta = -k_1 r - k_2 \psi \quad (3.7)$$

minimera förlustfunktionen

$$J = \sum x^T Q_1 x + e\delta^2$$

där $Q_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ och $e=0.1$.

Då ges $L = (k_1 \quad k_2)$ av

$$L = (e + \Gamma^T S(t+1) \Gamma)^{-1} \Gamma^T S(t+1) \phi \quad (3.8)$$

där

FARTYGSSTYRNING

$$S(t) = \phi^T S(t+1) \phi + Q_1^{-1} - L^T (\rho + \Gamma^T S(t+1) \Gamma) L \quad (3.9)$$

och vi valt den stationära lösningen av (3.9) dvs

$$S = \phi^T S \phi + Q_1^{-1} - L^T (\rho + \Gamma^T S \Gamma) L \quad (3.10)$$

ϕ och Γ är matriser i den diskreta representationen av Nomotomodellen:

$$\dot{x} = Ax + B\delta = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} K \\ B \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (3.11)$$

dvs de är matriserna i följande uttryck

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma \delta \quad (3.12)$$

De ges av

$$\phi = e^{AT_0} = \begin{bmatrix} e^{-\alpha T_0} & 0 \\ 1 & -\alpha T_0 \\ \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_0}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

och

$$\Gamma = \int_0^{T_0} e^{At} B dt = \frac{K}{\alpha} \begin{bmatrix} 1 - e^{-\alpha T_0} & -\alpha T_0 \\ T_0 - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_0}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

där T_0 är samplingstiden.

Med vetskap om detta löser vi nu (3.10), som efter insättning av (3.8) blir

$$S(t) = \phi^T S \phi + Q_1^{-1} - (\Gamma^T S \phi)^T \Gamma^T S \phi (\rho + \Gamma^T S \Gamma)^{-1} \quad (3.15)$$

Med $S = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \end{bmatrix}$ blir (3.15) komponentvis:

FARTYGSSTYRNING

$$\begin{cases} S_1 = S_1 \phi_{11}^2 + 2S_2 \phi_{11} \phi_{21} + S_3 \phi_{21}^2 - T_1^2 / u \\ S_2 = S_2 \phi_{11} + S_3 \phi_{21} - T_1 \cdot T_2 / u \\ S_3 = S_3 + 1 - T_2^2 / u \end{cases} \quad (3.16)$$

där

$$\begin{aligned} T_1 &= S_1 \phi_{11} \Gamma_1 + S_2 (\phi_{11} \Gamma_2 + \phi_{21} \Gamma_1) + S_3 \phi_{21} \Gamma_2 \\ T_2 &= S_2 \Gamma_1 + S_3 \Gamma_2 \\ u &= S_1 \Gamma_1^2 + 2S_2 \Gamma_1 \Gamma_2 + S_3 \Gamma_2^2 + \varrho \end{aligned}$$

Dessa ekvationer är besvärliga att finna analytisk lösning till och har därför lösts numeriskt med substitutionsmetoden, med hjälp av program som finns dokumenterat i Program matrix. De värden på L som på detta sätt beräknats finns angivna i tabell 3.1

T	k_1	k_2
0		
1	-198.06	-3.1086
2	-196.10	-3.0559
5	-191.31	-2.9030
10	-183.30	-2.6653

tabell 3.1 Återkopplingskoefficienter L i (3.7) vid olika samplingsstider

Den diskreta regulatorn finns i form av ett Simnon-program i Appendix B:2. Även denna regulator har provats vid simuleringar med Nomoto-modellen. Resultaten presenteras i figur 3.2. Även här har vi simulerat en referensvärdesändring, girhastighetsstörningar och störningar från sinusvågor. I dessa fall har samplingsstiden valts till 10 s. Dessutom har vi reglerat den av sinusvågor störda båten med samplingsstiden 2 s för att jämföra kursen i de olika fallen. Vi kan då konstatera att vi har en obetydligt större skillnad mellan kursens extremvärden vid den långa samplingsstiden än vid den korta. Vi kan också se att vi har mindre bias på kursen då vi samplar mera sällan.

3.3 Reglering med tillståndsåterkoppling dimensionerad för förenklad modell

Avsnittet behandlar en undersökning av vad som händer då man försöker reglera modellen med tre tillstånd genom att återkoppla från endast kurs och girhastighet på det sätt som är optimalt för Nomoto-modellen. Först presenteras resultat

FARTYGSSTYRNING

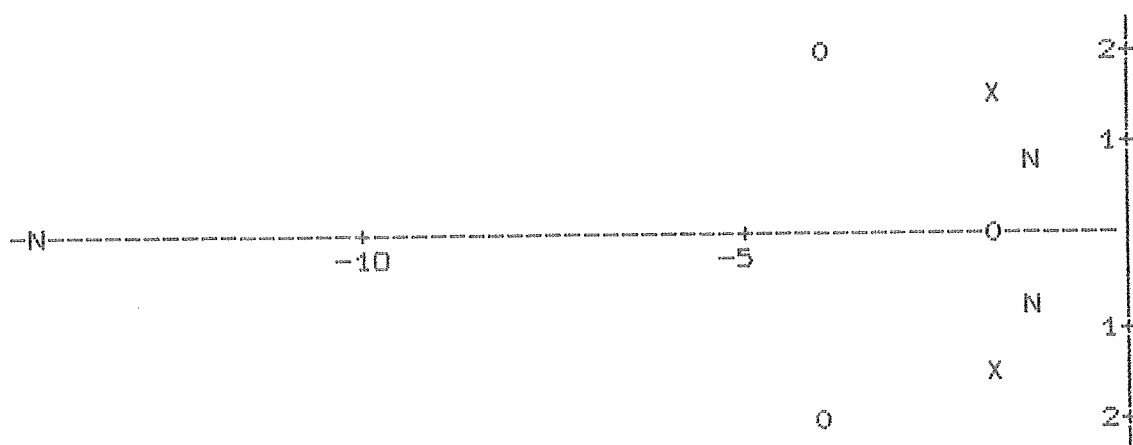
av simuleringar och dessa diskuteras. Därefter följer en utredning av polernas placering i de olika fallen. Slutligen betraktar vi fallet att man på analogt sätt dimensionerar en regulator för en ettillståndsmodell och använder den på Nomotomodellen.

Tretillståndsmodellen

I figur 3.3 ser vi roderutslag och kurs då vi för den på ovan angivet sätt reglerade båten gör en ändring av kursens börvärde. I modellen med tre tillstånd är tidskonstanten större. Roderutslaget är dock ungefär lika stort som vid reglering av Nomoto-modellen. Då vi ska använda regulatorn för att reglera ut störningar kommer vi emellertid att behöva mycket större rodervinklar än vid styrning av Nomoto-modellen (se figur 3.4) och förmågan att reglera ut störningarna blir också sämre. En intuitiv förklaring är att störningen av girhastigheten blir större i modellen med tre tillstånd, eftersom tvärhastigheten primärt inte påverkas av störningar, medan den i Nomoto-modellen är inkorporerad i girhastighetstillståndet.

Vi har gjort en hel del försök att finna stabilitetsvillkor för en komplicerad modell styrd med en regulator, som är dimensionerad för en enklare modell. Dessa strävanden har dock inte lett till något resultat, då räkningarna visade sig alltför omfattande.

I det speciella fallet har vi emellertid tittat på polernas lägen och sett hur de flyttat sig då vi förenklat regulatorn. Polernas placering i de olika fallen presenteras i figur 3.6 och har beräknats på följande sätt.



figur 3.6 Polkonfiguration (Enhet 1/100)
 O = Optimal regulator (tre tillstånd)
 N = Nomoto-regulator (tre tillstånd)
 X = Optimal regulator (två tillstånd)

Den optimalt reglerade Nomoto-modellen har den karakteristiska ekvationen:

$$\det \begin{bmatrix} \lambda + \alpha + k \ell_{B 1N} & k \ell_{B 2N} \\ -1 & \lambda \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{där } \alpha &= -1.276 \cdot 10^{-3} \\ k &= -1.715 \cdot 10^{-4} \\ \ell_{B} &= -199.6 \\ \ell_{1N} &= -3.162 \\ \ell_{2N} & \end{aligned}$$

Detta ger $\lambda_{1,2} = -0.01648 \pm i \cdot 0.01645$.

Används samma regulator på tretillståndsmodellen blir karakteristiska ekvationen:

$$\det \begin{bmatrix} \lambda - \alpha_1 & -\alpha_2 + k \ell_{1 1N} & k \ell_{1 2N} \\ -\alpha_3 & \lambda - \alpha_4 + k \ell_{2 1N} & k \ell_{2 2N} \\ 0 & -1 & \lambda \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{där } \alpha_1 &= -9.861 \cdot 10^{-3} \\ \alpha_2 &= -3.588 \\ \alpha_3 &= -1.290 \cdot 10^{-4} \\ \alpha_4 &= -3.993 \cdot 10^{-2} \\ k_1 &= -5.980 \cdot 10^{-4} \\ k_2 &= 2.638 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Löser vi ekvationen får vi

$$\begin{cases} \lambda_1 &= -0.1452 \\ \lambda_{2,3} &= -0.01197 \pm i \cdot 0.007701 \end{cases}$$

Om vi återkopplar optimalt från alla tillstånd i tretillståndsmodellen får vi:

$$\det \begin{bmatrix} \lambda - \alpha_1 + k \ell_{1 13} & -\alpha_2 + k \ell_{1 23} & k \ell_{1 33} \\ -\alpha_3 + k \ell_{2 13} & \lambda - \alpha_4 + k \ell_{2 23} & k \ell_{2 33} \\ 0 & -1 & \lambda \end{bmatrix} = 0$$

där $L_3 = (\ell_{13} \ell_{23} \ell_{33})$ beräknats genom numerisk lösning av

FARTYGSSTYRNING

ekv (3.3) och (3.4). Se Program sopfb3. Deras värden blev:

$$\begin{aligned} \lambda_{13} &= 0.2204 \\ \lambda_{23} &= -65.61 \\ \lambda_{33} &= -3.162 \end{aligned}$$

Resultatet av dessa räkningar blev

$$\begin{cases} \lambda_1 &= -0.01534 \\ \lambda_{2,3} &= -0.03975 \pm i \cdot 0.01837 \end{cases}$$

De stegsvar som vi sett i figur 3.1 och 3.3 och det vi ser i figur 3.5 överensstämmer med vad vi kan vänta oss från poldiagrammet.

Tvåtillståndsmodellen

Vi ska nu dimensionera en regulator för en ettillståndsmodell och försöka reglera Nomoto-modellen med denna. Vi väljer ψ som enda tillstånd, dvs modellen blir

$$\dot{\psi} = a\psi + b\delta \quad \text{med } a = 0 \text{ och } b = -k/\alpha$$

där a och b bestämts analogt med bestämningen av Nomoto-modellens α ur tretillståndsmodellen. Återkopplingen blir

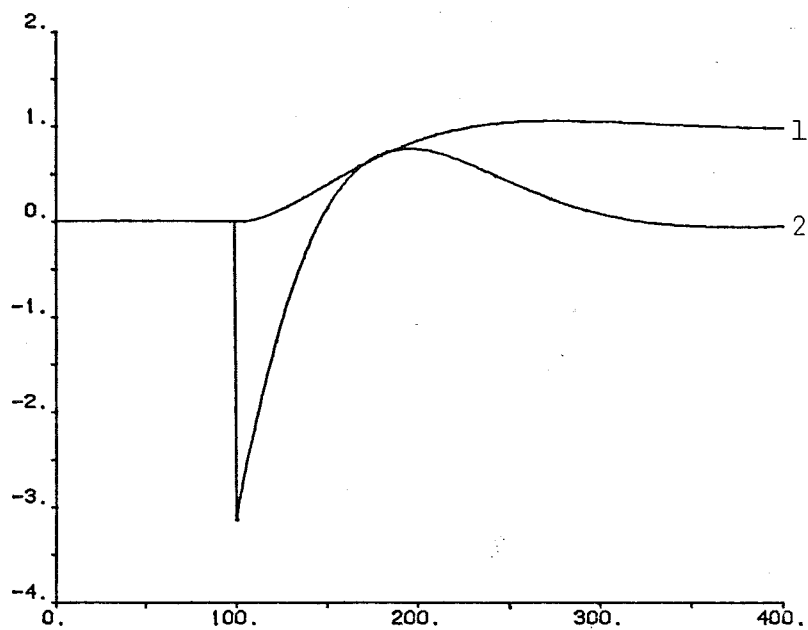
$$\delta = -\lambda\psi \quad \text{med } \lambda = -1/\varrho.$$

Den karakteristiska ekvationen för Nomoto-modellen återkopplad med denna enkla regulator blir:

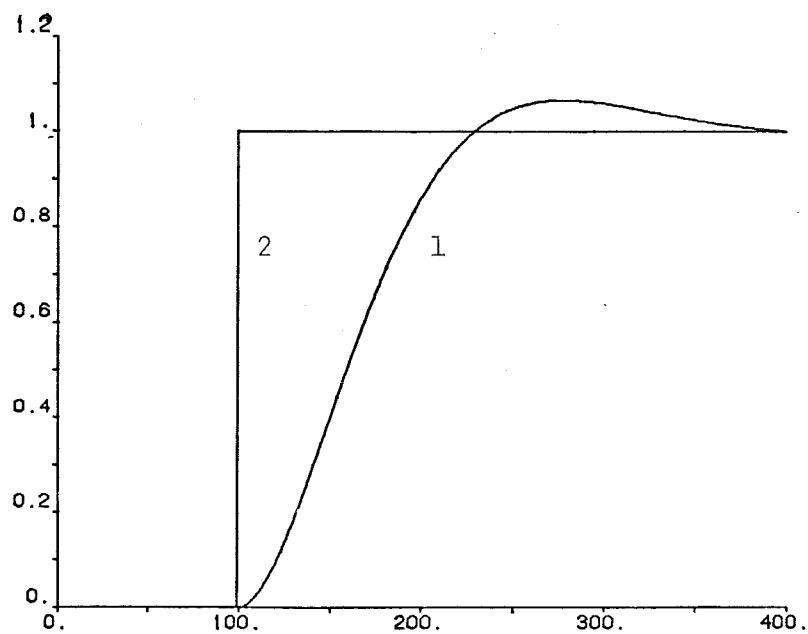
$$\det \begin{bmatrix} \lambda + \alpha & k\lambda \\ -1 & \lambda \end{bmatrix} = 0$$

$$\text{och } \lambda = -\frac{\alpha}{2} \pm \left[\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - k\lambda \right]$$

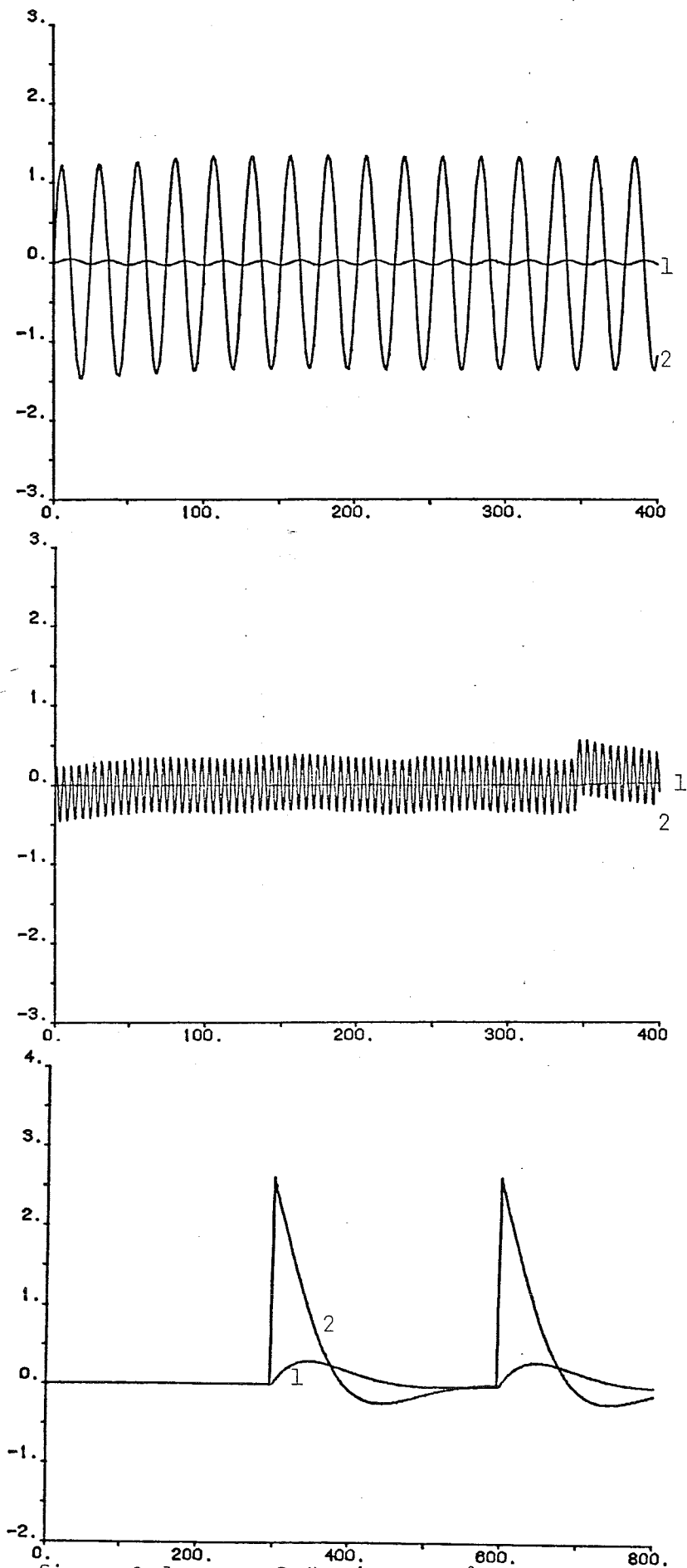
Eftersom $\alpha < 0$ får vi en pol i höger halvplan och i detta fall är således den enkla återkopplingen instabil.



figur 3.1(a) Börvärdesförändring för Nomoto-modell
styrd med optimal tillståndsregulator
1) Kurs (grader)
2) Roderutslag (grader)



figur 3.1(b) Börvärdesförändring för Nomoto-modell
styrd med optimal tillståndsregulator
1) Kurs (grader)
2) Börvärde (grader)

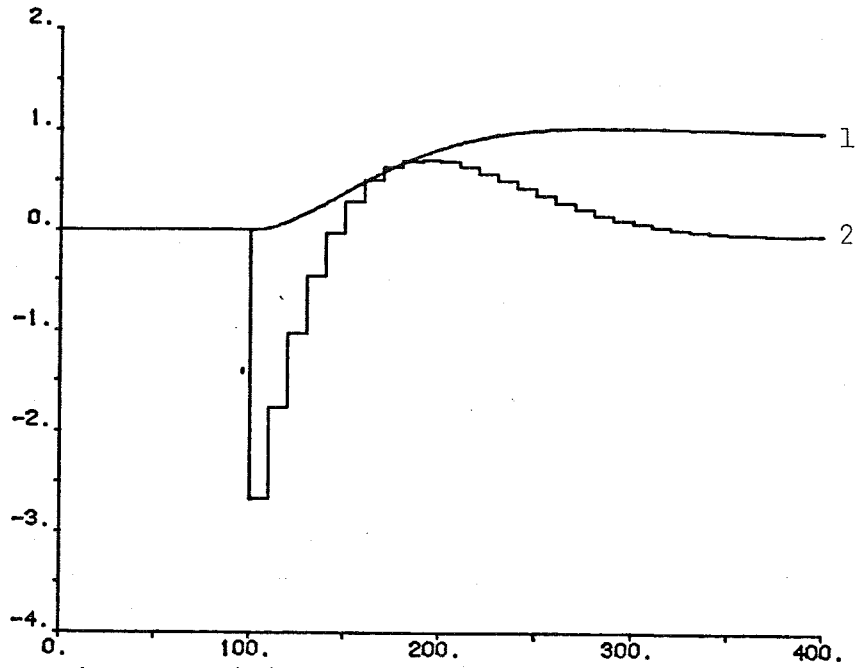


figur 3.1

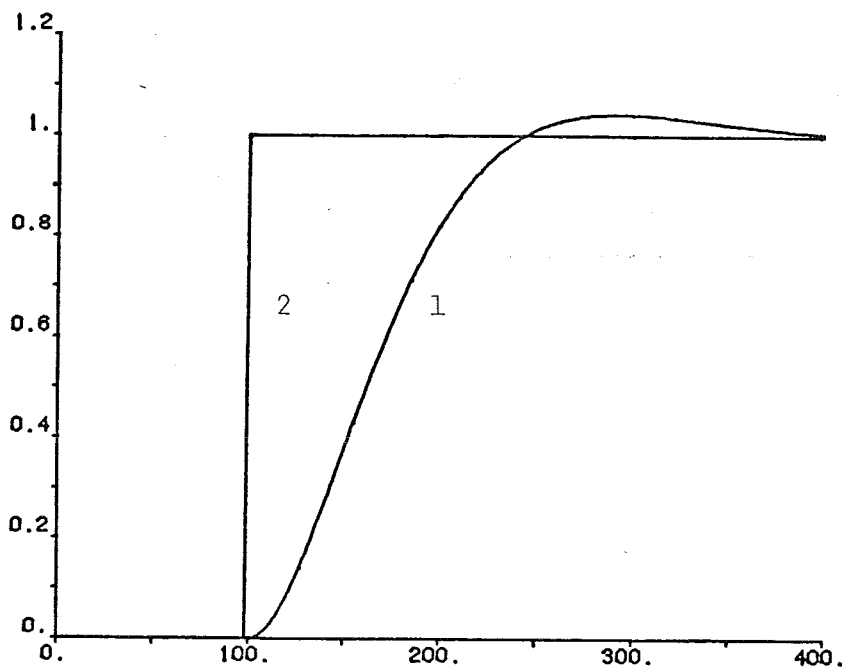
Störningar på Nomoto-modell

styrd med optimal tillståndsregulator

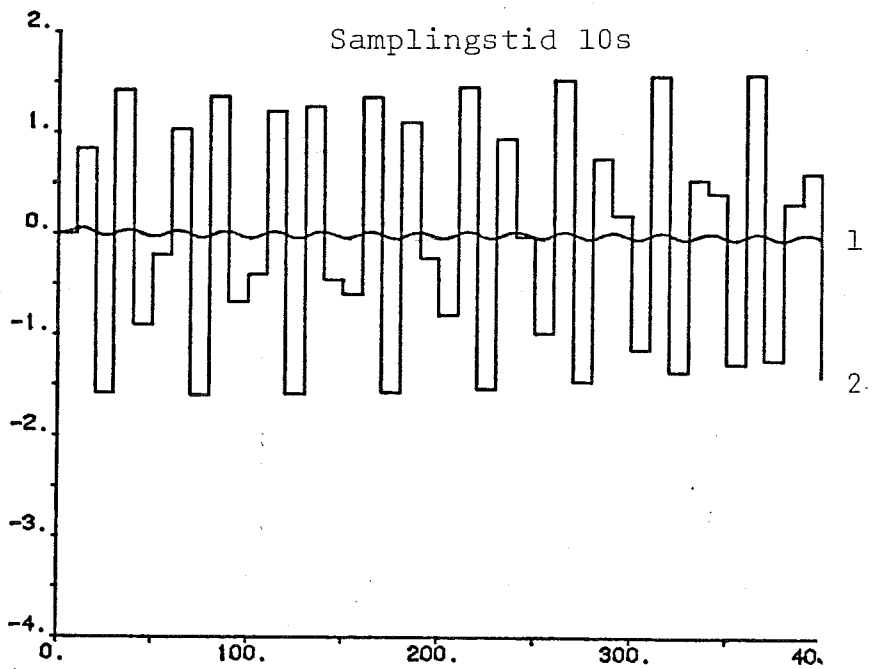
- (c) Sinusformade vågor med infallsvinkel 160°
- (d) Sinusformade vågor med infallsvinkel 70°
- (e) Girhastighetsstörning
- 1) Kurs (grader)
- 2) Roderutslag (grader)



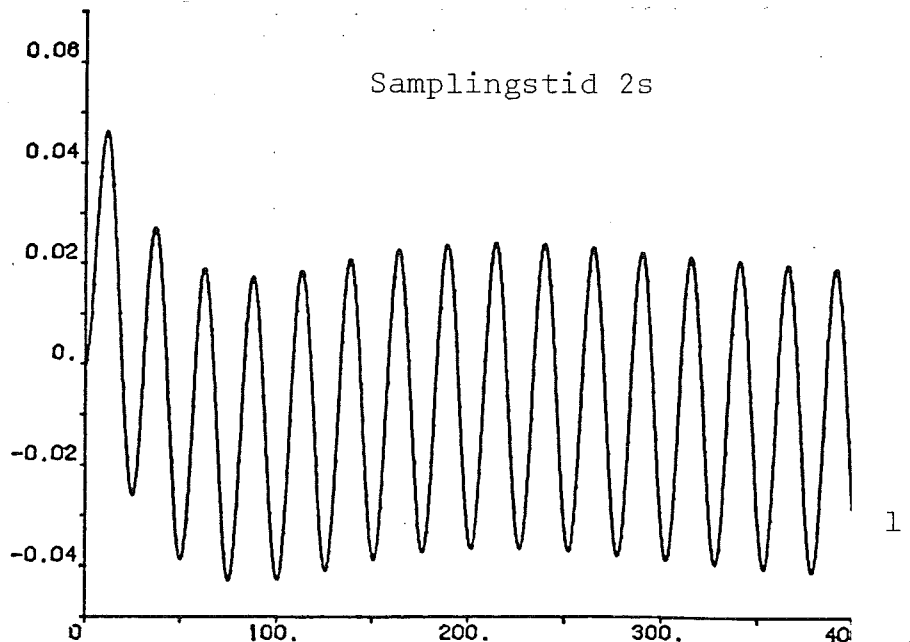
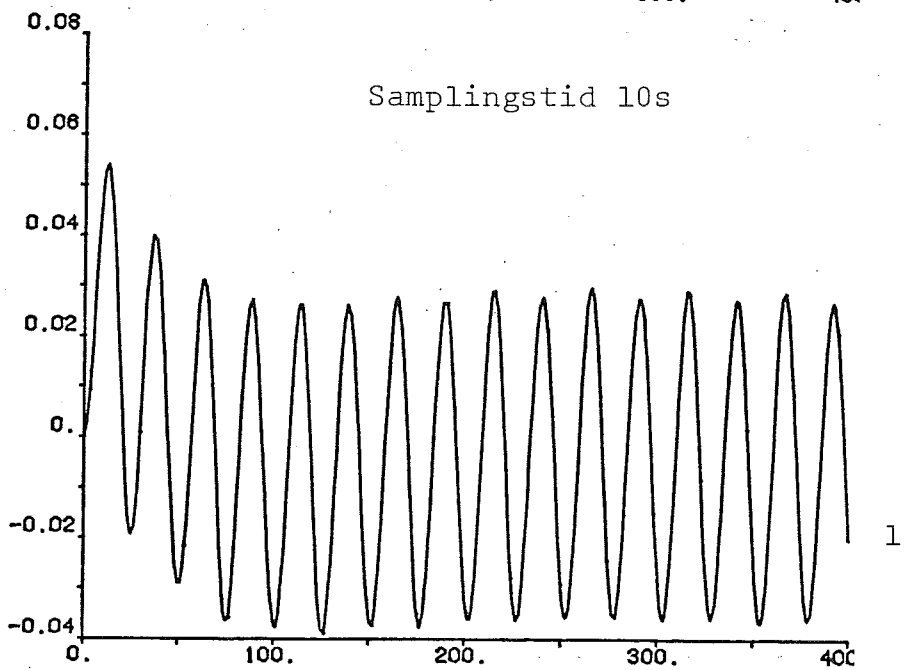
figur 3.2(a) Börvärdesförändring för Nomoto-modell
 styrd med optimal tillståndsregulator
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



figur 3.2(b) Börvärdesförändring för Nomoto-modell
 styrd med optimal tillståndsregulator
 1) Kurs (grader)
 2) Börvärde (grader)

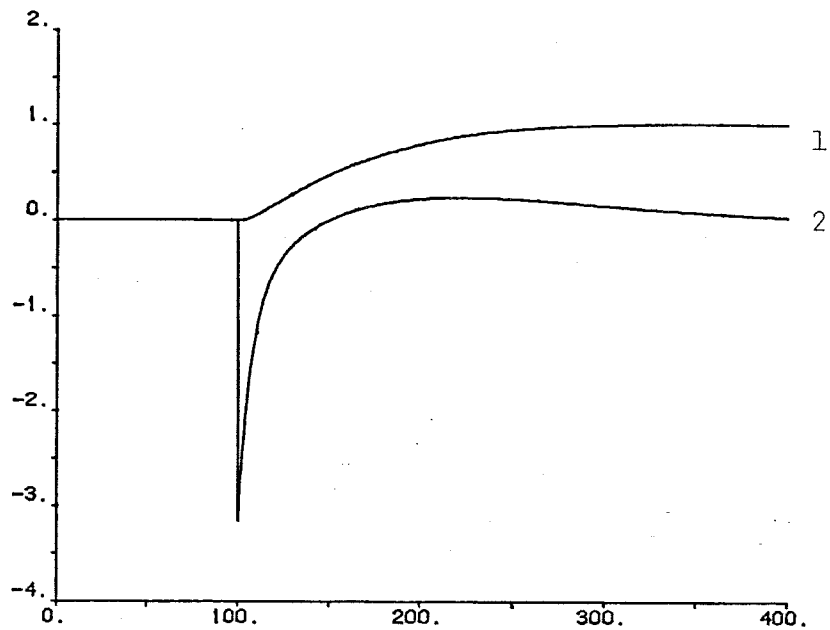


11

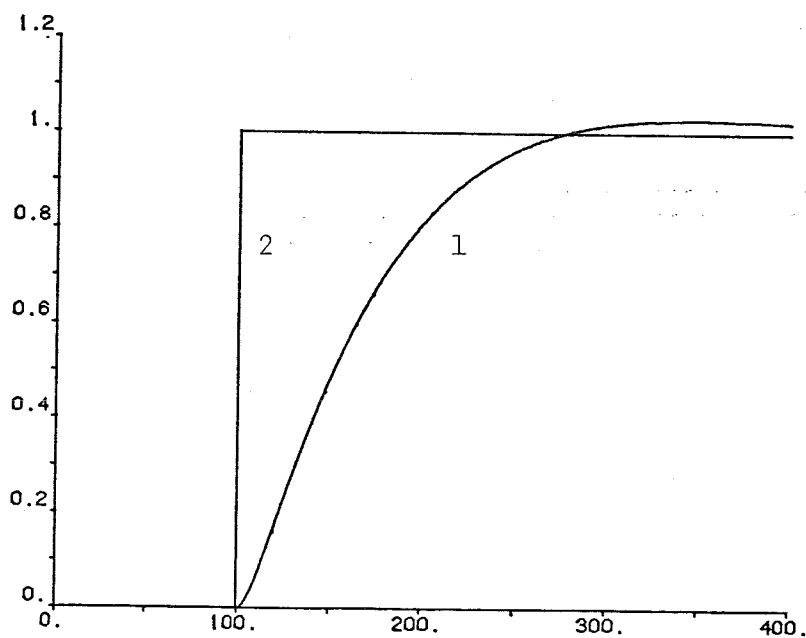


figur 3.2(c-e) Sinusformade störningar (160°) på Nomoto-modell styrd med optimal tillståndsregulator

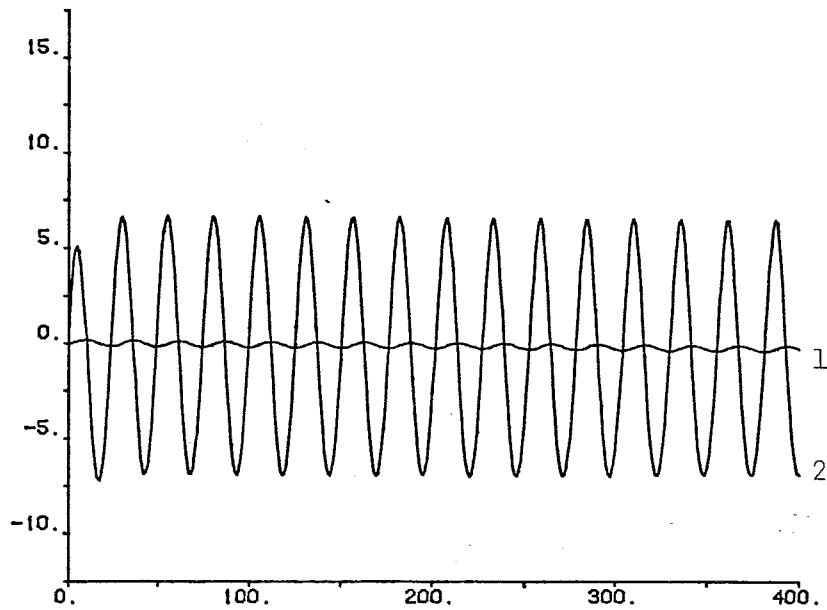
- 1) Kurs (grader)
- 2) Roderutslag (grader)



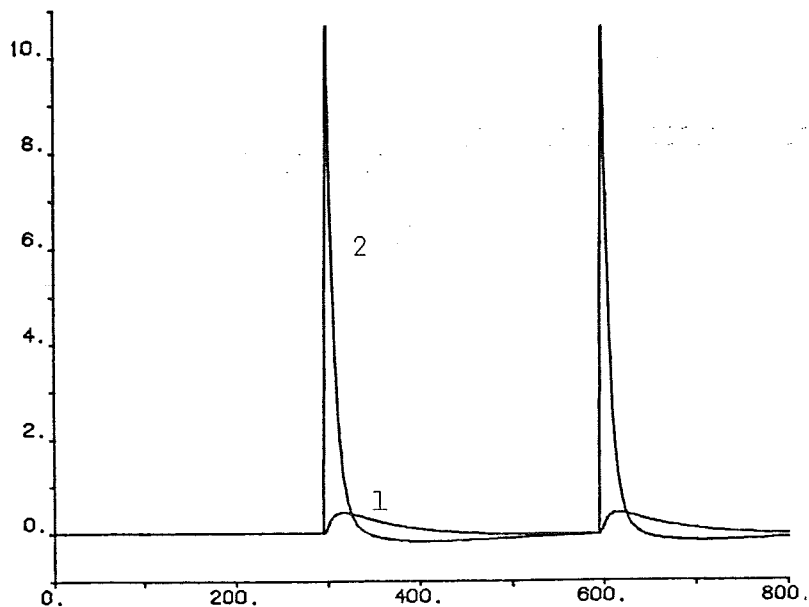
figur 3.3(a) Börvärdesförändring för tretillståndsmodellen styrd med regulator designad för Nomoto-modellen
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



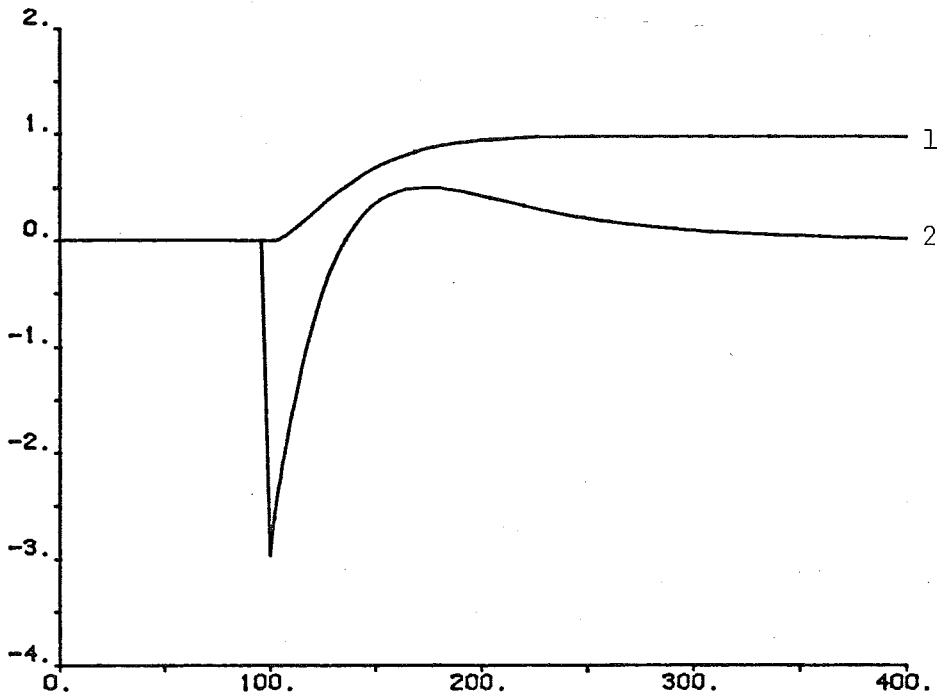
figur 3.3(b) Börvärdesförändringar för tretillståndsmodellen styrd med regulator designad för Nomoto-modellen
 1) Kurs (grader)
 2) Börvärde (grader)



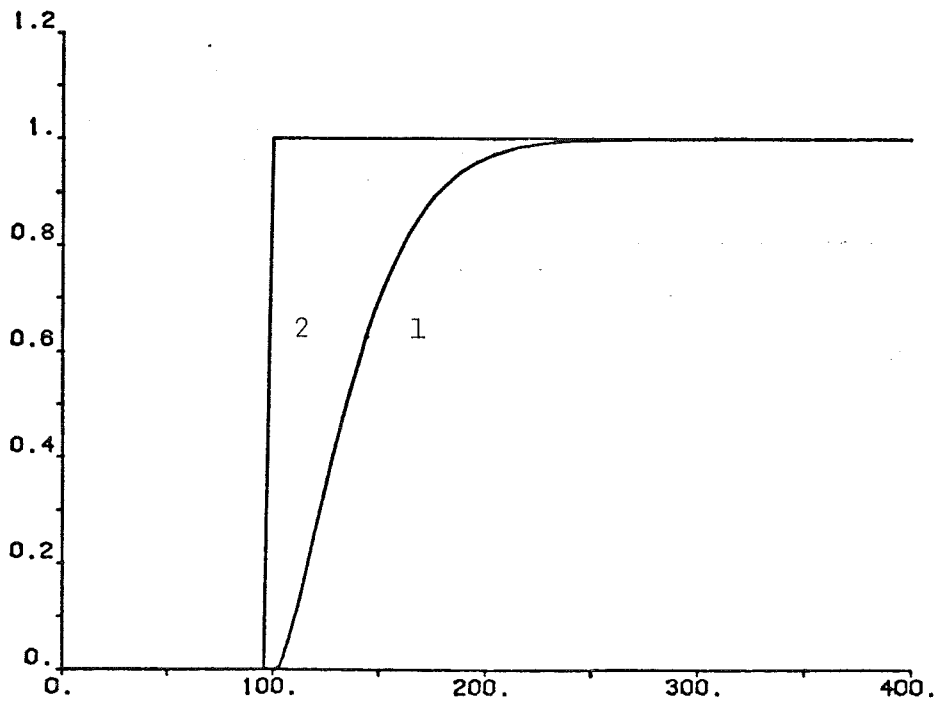
figur 3.4(a) Sinusformade störningar (160°) på
 tretillståndsmodellen styrd med
 regulator designad för Nomoto-modellen
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



figur 3.4(b) Girhastighetsstörningar på
 tretillståndsmodellen styrd med
 regulator designad för Nomoto-modellen
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



figur 3.5(a) Börvärdesförändring för tretillståndsmodellen styrd med optimal tillståndsregulator
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



figur 3.5(b) Börvärdesförändringar för tretillståndsmodellen styrd med optimal tillståndsregulator
 1) Kurs (grader)
 2) Börvärde (grader)

FARTYGSSTYRNING

4. Tillståndsrekonstruktion

Eftersom mätning av girhastigheten är besvärlig är rekonstruktion av girhastigheten från kursen ett lockande alternativ. Kalmanfilter, både i kontinuerlig och tidsdiskret formulering, har tagits fram för detta ändamål och dess funktion har prövats genom simuleringar. Effekten av felaktiga systemparametrar i filtret, samt de rekonstruerade tillståndens avvikelse från de sanna har studerats. Sammanfattningsvis utgör filtret en fullgod ersättare för direktmätning av tillstånd.

4.1 Kontinuerligt Kalmanfilter

Modellen för båten ges av

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\delta + V \\ y = Cx + e \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{med } x = \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} \quad (\text{jfr 2.29})$$

$$\text{där } A = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} K \\ B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} K \\ F \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1]$$

Eftersom systemet är fullständigt observerbart kan tillstånden rekonstrueras:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\delta + K(\psi - \hat{\psi}) \quad \text{med } K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bestämning av K_1 och K_2 sker genom lösning av ekvationen

$$\begin{cases} \dot{P} = AP + PA^T + R_1 + PC R_2^{-1} CP^T \\ K = PC R_2^{-1} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\text{där } R_1 = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{och } R_2 = r_2.$$

FARTYGSSTYRNING

r_1 resp r_2 är varianserna för processtörningen v resp mätbruset e . För att förenkla lösningen betraktas en approximation (α och K_B små) av den stationära ekvationen

$\dot{P}=0$. Då fås :

$$\begin{cases} K_1 = r_1 / r_2 \\ K_2 = 4 r_1 / r_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

Denna approximation visade sig stämma väl överens med en numerisk lösning av ekvationen. Lösningen togs fram med hjälp av Program pkalm2.

K_F har vi betraktat som processtörning, varvid r_1 i fallet med sinusformade vågor har bestämts ur simuleringar under antagandet att störningen blir approximativt sinusformad (se tabell 4.1). r_1 för andra vindhastigheter får man genom skalning, varvid det gäller att a är proportionell mot v_T . I fallet med girhastighetsstörningar har inverkan beräknats för $\dot{r}_0 = 0.03^0/s$ och a bestämts till 0.110. Variansen r_1 fås sedan som

$$r_1 = 0.110^2 (\dot{r}_0 / 0.03)^2 (m_{per} - m_{dur})^2 m_{dur} / m_{per}^2$$

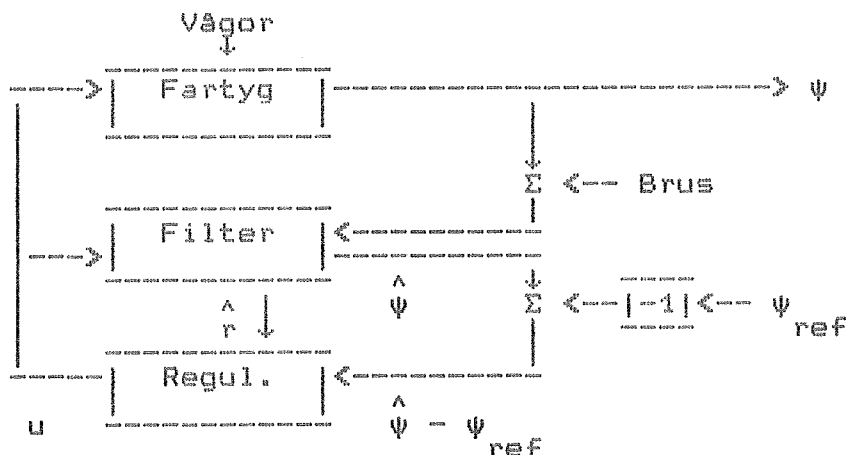
r_2 kan vi enl [1] sätta till 0.05^2 . Ett Simmon-program för filtret finns i appendix C:1.

y_w	a	r_1	($v_T = 10 \text{ m/s}$)
25	0.14	0.01	
70	0.54	0.146	
115	0.31	0.0480	
160	0.125	0.0781	

tabell 4.1 a = störningsamplituden
 v_T = vindhastigheten

Kalmanfiltret har i simuleringarna använts till att förse de optimala tillståndsregulatorerna beskrivna i föregående kapitel med girhastighet och kursvinkel (certainty

equivalence-principen). Se figur 4.1.



figur 4.1

Simuleringar motsvarande de som gjorts i kapitel 3 genomfördes med rekonstruerade tillstånd. Simuleringsresultaten framgår av fig 4.2-4.3. Filtret klarar av rekonstruktionen bra och ingen märkbar avvikelse från beteendet hos systemet då direktmätta tillstånd använts (jfr fig 3.1) kan iakttagas.

Därefter försökte vi inkludera störningarnas konstanta bidrag, vilket vi ser som ett roderbias δ_0 i modellen enligt följande:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(\delta + \delta_0) + V \\ y = Cx + e \end{cases} \quad (4.5)$$

Vi kan införa δ_0 som tillstånd och får då nya matriser A, B

och C. Med samma metodik som tidigare bestämdes K och ett utvidgat Kalmanfilter implementerades men fungerade ej. Efter en del försök konstaterades att felet, med sannolikhet gränsande till visshet, ej ligger i vårt program utan beror på problem vid editeringen av programkoden.

4.2 Diskret Kalmanfilter

Modellen ges av

$$\begin{cases} x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t) + V(t) \\ y(t) = \theta x(t) + e(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

med $x(t) = \begin{bmatrix} r(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix}$ och där

$$\phi = \begin{bmatrix} e^{-\alpha T} & 0 & 0 \\ 1 & -e^{-\alpha T} & 0 \\ \frac{1}{\alpha} & (1 - e^{-\alpha T}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} K & B & (1 - e^{-\alpha T}) & 0 \\ 1 & K & T & -\frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T}) \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} K' \\ F \\ 0 \end{bmatrix}$$

Eftersom även det tidsdiskreta systemet är observerbart kan rekonstruktion ske:

$$\hat{x}(t+1) = \phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) + K(t) (\psi(t) - \hat{\psi}(t)) \quad (4.7)$$

där $K(t) = \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_2(t) \end{bmatrix}$ bestäms ur

$$\begin{cases} K(t) = \phi P(t) \theta^T [\theta P(t) \theta^T + R_2]^{-1} & (4.8) \\ P(t+1) = \phi P(t) \phi^T - \phi P(t) \theta^T [\theta P(t) \theta^T + R_2]^{-1} \phi P(t) \phi^T + R_1 = \\ \phi P(t) \phi^T - K(t) \theta P(t) \phi^T + R_1 \end{cases}$$

med $\hat{x}(0) = 0$ och $P(0) = 0$.

R_1 och R_2 är definierade i föregående avsnitt.

Ekvation 4.8 utvecklas komponentvis och löses iterativt. Se appendix C:2 där Simmon-programmet för filtret finns.

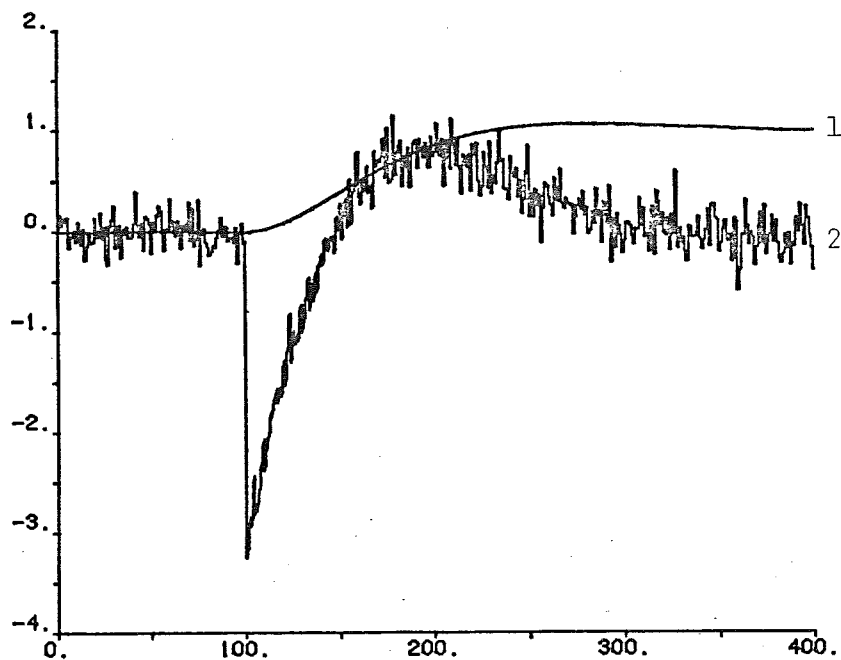
Simuleringarna presenterade i fig 4.4 visar att rekonstruktionen inte heller här innebär någon förändring gentemot direkt mätning, varför uppträdandet hos systemet kan förväntas sammanfalla med det i avsnitt 3.2 presenterade. Även för det diskreta filtret gjordes försök med inkludering av roderbias. Resultatet blev av samma bedrägliga karaktär som för det kontinuerliga filtret.

4.3 Modellfel och rekonstruktionsfel

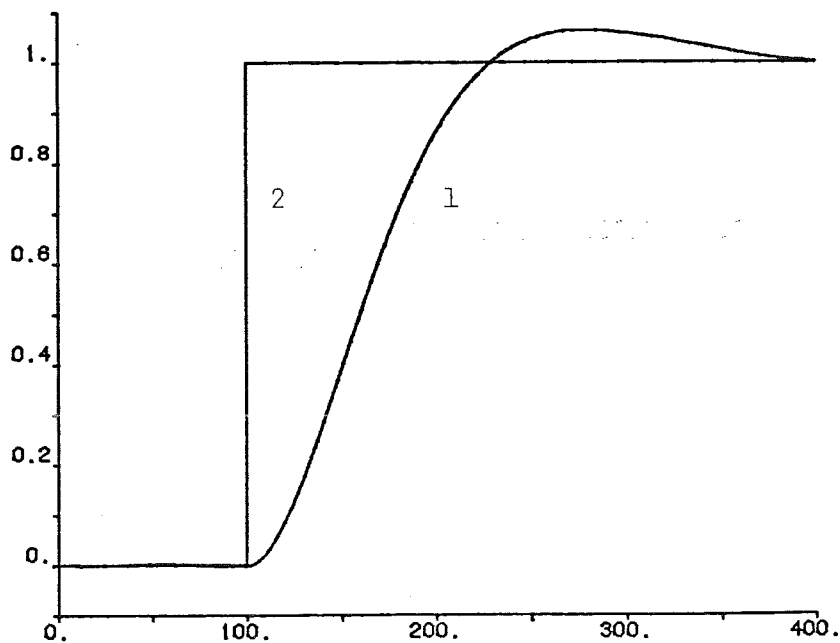
Då rekonstruktion bygger på att man exakt känner systemparametrarerna, är filtrets funktion beroende av hur väl man känner dessa. För att undersöka regulatorns beteende då felaktigt rekonstruerade tillstånd användes, införde vi

en möjlighet att variera parametrarna i rekonstruktionsmodellen. Simuleringar visar att fel i systemparametrarna på 10% trots allt inte försämrar stegsvaret nämnvärt. Se figur 4.5.

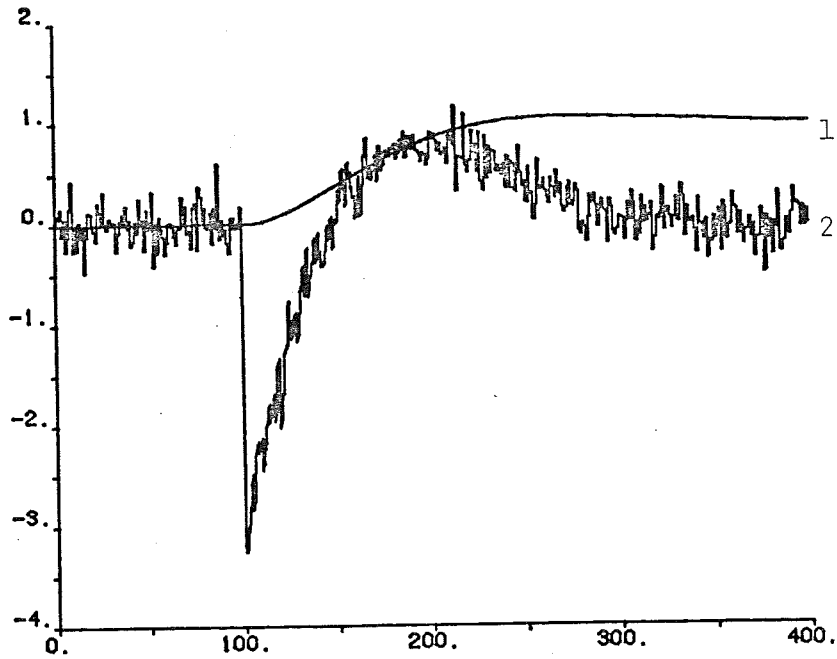
Även avvikelserna mellan de sanna och rekonstruerade tillstånden $\bar{x} = x - \hat{x}$ ger en bild av hur väl filtret fungerar. Vi kan i fig 4.6 se att för båda de kontinuerligt estimerade tillstånden gäller att medelvärdet är nära eller lika med noll. För \bar{r} kan nämnas att den kursändring på 1° som sker vid tiden 100 s ger upphov till girhastigheter på ca $2 \cdot 10^{-4}$ rad/s, att jämföra med maximala avvikelserna på $6.5 \cdot 10^{-9}$ rad/s. Det diskreta filtret arbetande tillsammans med reglering var 10:e sekund ger maximalt en ca 5%-ig avvikelse i girhastighet och ett kursfel på $2 \cdot 10^{-4}$ rad, vilket framgår av fig 4.7. Även med dessa betydligt större rekonstruktionsfel uppför sig filtret fullt tillfredsställande.



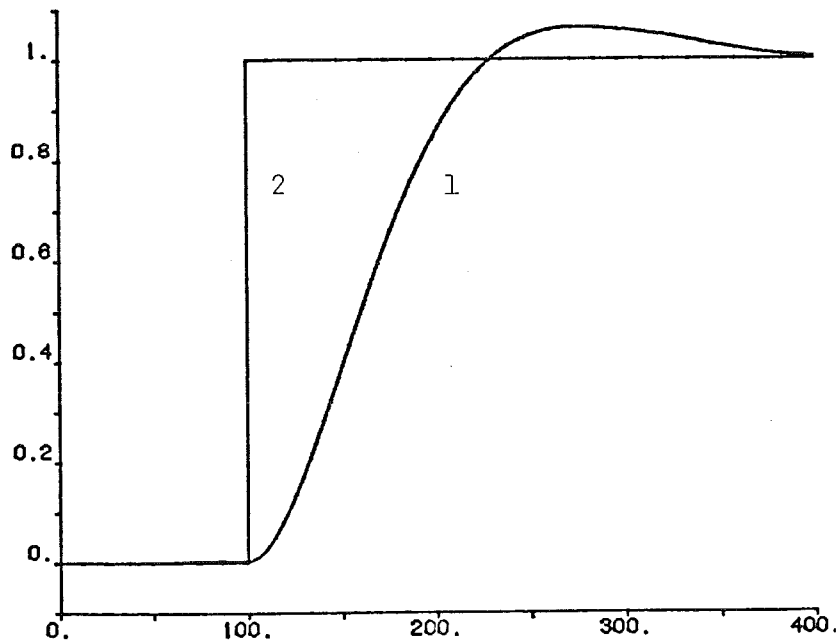
figur 4.2(a) Börvärdesförändring för Nomoto-modellen styrd med optimal tillståndregulator då mätbrus inkluderats
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



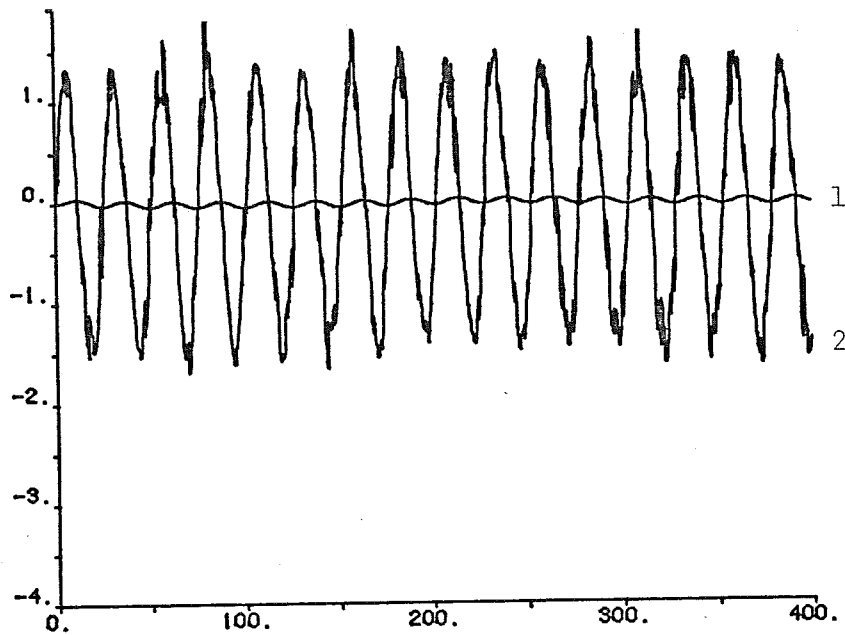
figur 4.2(b) Börvärdesförändring för Nomoto-modellen styrd med optimal tillståndregulator då mätbrus inkluderats
 1) Kurs (grader)
 2) Börvärde (grader)



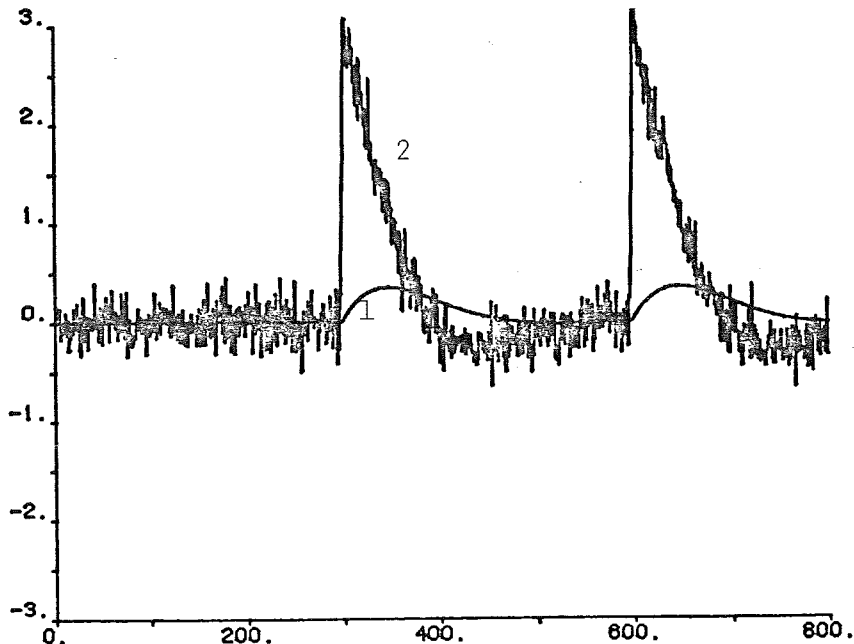
figur 4.3(a) Börvärdesförändring för Nomoto-modell styrd med optimal tillståndregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



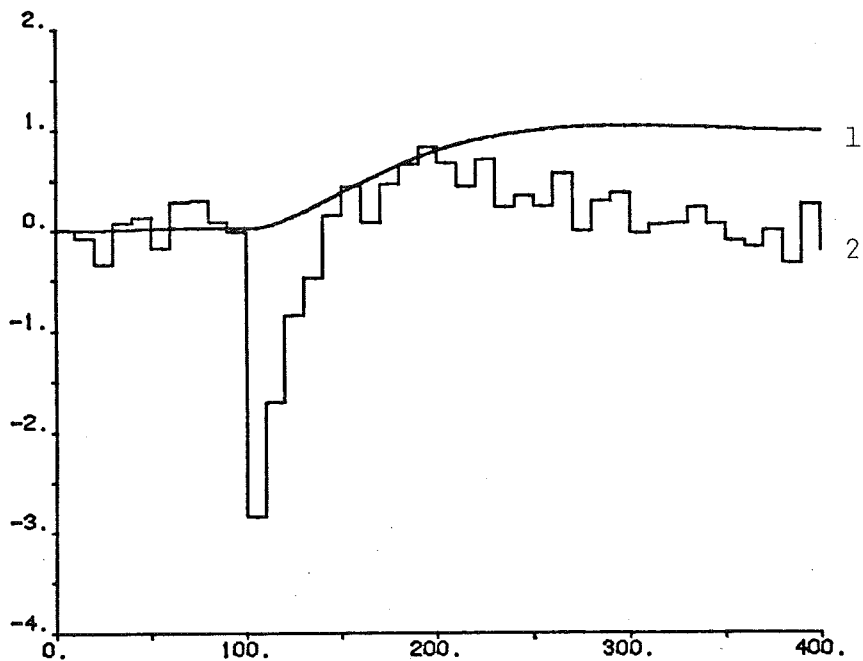
figur 4.3(b) Börvärdesförändring för Nomoto-modell styrd med optimal tillståndregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



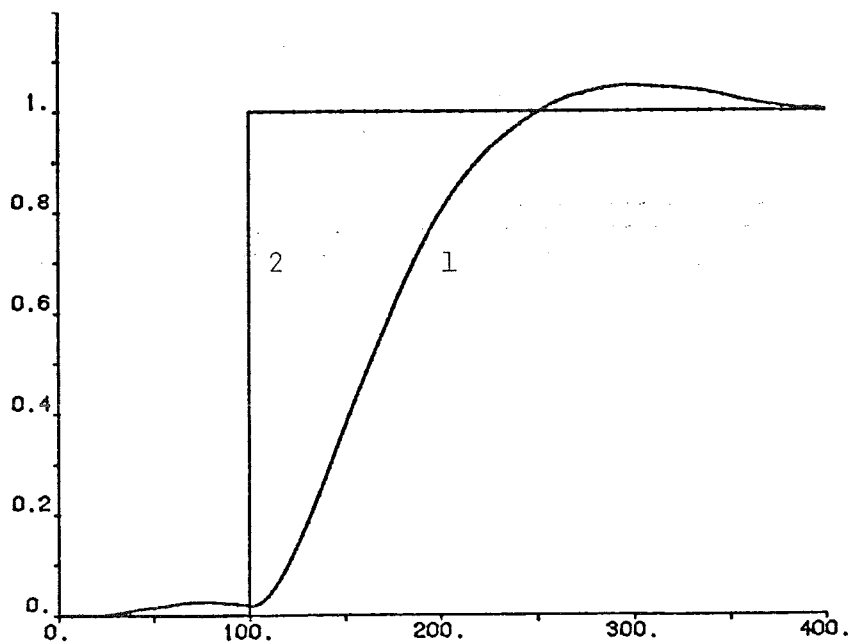
figur 4.3(c) Sinusformade störningar (160°) på Nomoto-modell styrd med optimal tillståndsregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



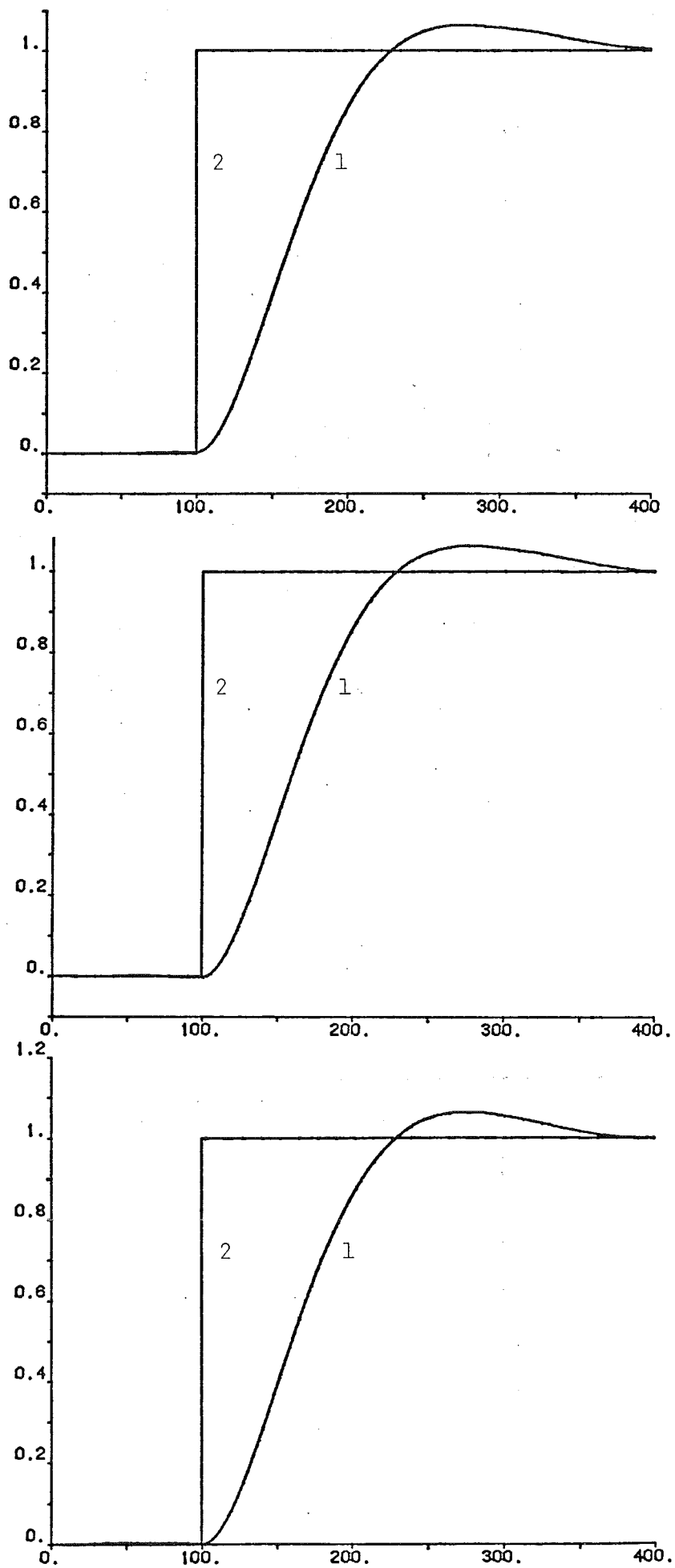
figur 4.3(d) Girhastighetsstörningar på Nomoto-modell styrd med optimal tillståndsregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



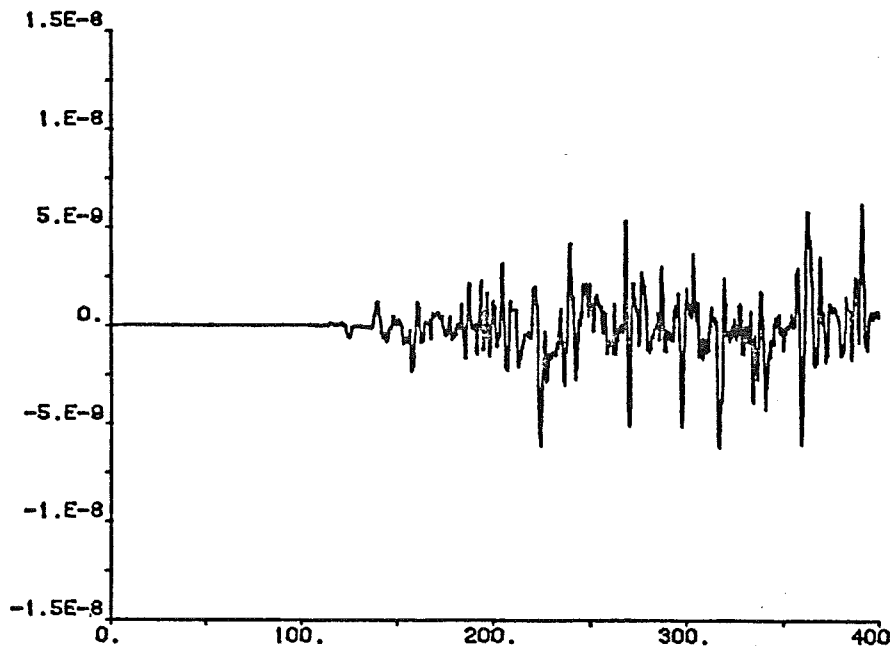
figur 4.4(a) Börvärdesförändring för Nomoto-modell styrd med optimal tillståndregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



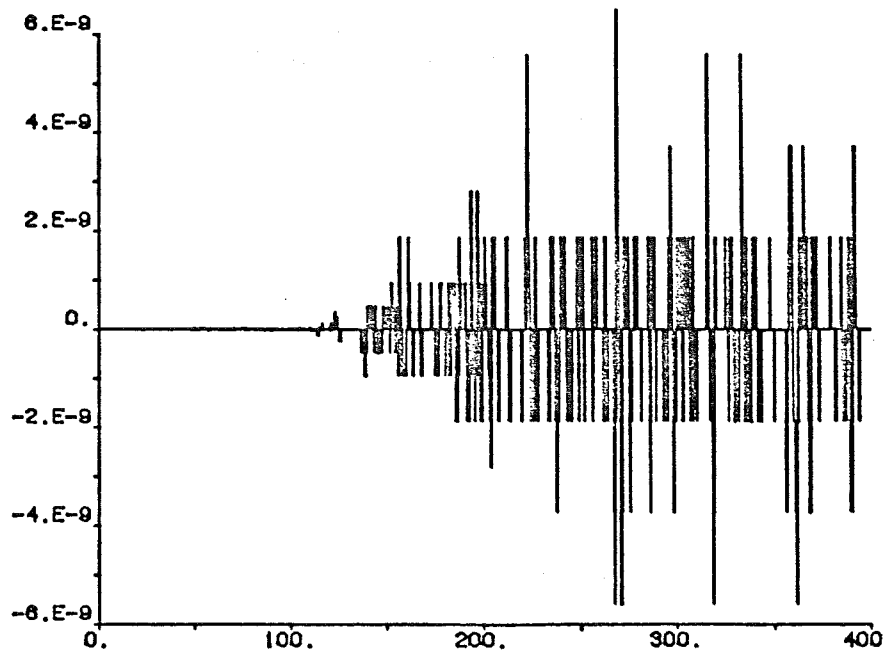
figur 4.4(b) Börvärdesförändring för Nomoto-modell styrd med optimal tillståndregulator och estimerade tillstånd
 1) Kurs (grader)
 2) Roderutslag (grader)



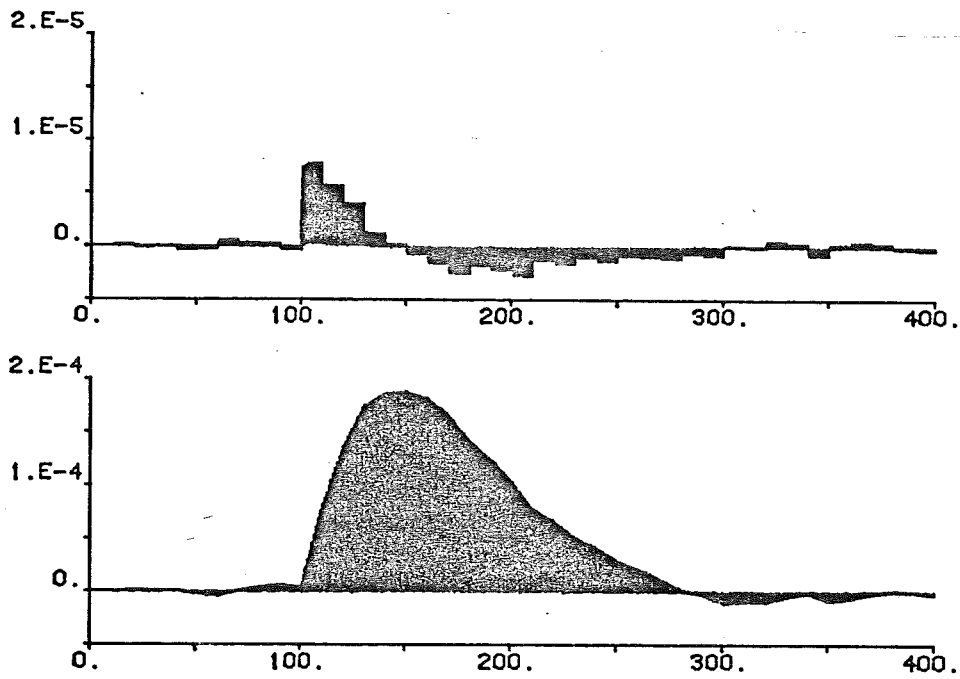
figur 4.5 Stegsvarets beroende av systemparametrarna
(a) Korrekta parametrarna
(b) 10% lägre α
(c) 10% lägre k



figur 4.6(a) Avvikelsen mellan den sanna och rekonstruerade girhastigheten



figur 4.6(b) Avvikelsen mellan den sanna och rekonstruerade kursen



figur 4.7 Avvikelsen mellan de sanna och
rekonstruerade tillstånden
(diskret representation)
(a) Girhastigheten
(b) Kursen

5. Självinställande regulator

Vi har studerat beteendet hos en självinställande regulator, baserad på minsta kvadratskattning och minimal varians reglering. Försöken har begränsats till tidsfördröjningar på högst fem samplingsintervall och till skattningsmodeller av högst ordning två.

5.1 Allmän teori

Modellen för båten kan vi skriva som

$$y(t+k) = r_0 [u(t) + r'_1 u(t-1) + \dots + r'_n u(t-n)] + s_0 y(t) + s_1 y(t-1) + \dots + s_m y(t-m) \quad (5.1)$$

där parametrarna kan skattas enligt minsta kvadratmetoden (se nedan). Styrsignalen ges då av

$$u(t) = -[s_0 \hat{y}(t) + \dots + s_m \hat{y}(t-m)]/r_0 - r'_1 \hat{u}(t-1) - \dots - r'_n \hat{u}(t-n). \quad (5.2)$$

Denna representation av regulatorn använder implicita parameterskattningar och leder till att beräkningen av styrsignalen blir trivial. Regulatorn är en minimal varians regulator, dvs minimerar en förlustfunktion som är väntevärdet av kvadratavvikelsen från kursens börvärde. Antalet parametrar begränsades dock till tre för varje polynom och dessutom fixerades r_0 . Enligt [2] konvergerar

regulatorn då $\hat{r}_0 \geq 0.5 r_0$.

Nu till skattningen av parametrarna i modellen (5.1). Denna sker genom en rekursiv minsta kvadratmetod vilken minimerar kriteriet

$$V = \sum_{k=1}^t \lambda^{t-k} \cdot \epsilon^2(k) \quad (5.3)$$

Glömskefaktorn λ gör att mindre vikt kan läggas vid gamla mätningar. Om vi har en modell enligt (5.1) med begränsad polynomordning inför vi en regressionsvektor

FARTYGSSTYRNING

$$\varphi(t) = [y(t-k) \ y(t-k-1) \ y(t-k-2) \ u(t-k-1) \ u(t-k-2)]^T \quad (5.4)$$

och en parametervektor

$$\theta(t) = [\hat{s}_0 \ \hat{s}_1 \ \hat{s}_2 \ \hat{r}'_1 \ \hat{r}'_2] \quad (5.5)$$

De rekursiva skattningarna ges nu av

$$\theta(t+1) = \theta(t) + P(t+1)\varphi(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (5.6)$$

där

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \theta(t)\varphi(t+1) \quad (5.7)$$

och

$$P(t+1) = [P(t) - P(t)\varphi(t)R(t)\varphi^T(t)P(t)]/\lambda' \quad (5.8)$$

med

$$R(t) = [\lambda + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)]^{-1} \quad (5.9)$$

$$\lambda' = \begin{cases} \lambda & \text{för diagonalelementen} \\ 1 & \text{f.ö.} \end{cases} \quad (5.10)$$

Se vidare i [2].

5.2 Standardfallet

För att få en regulator som uppför sig väl måste följande parametrar väljas till lämpliga värden:

modellordningen	deg S = 1, deg R = 1
tidsfördröjningen	k = 5
samplingstiden	h = 10
glömskefaktorn	$\lambda = 0.96$
första R-koefficient	$r_0 = -0.4$

Inledningsvis satte vi deg S = deg R = 1. Försök med högre modellordning genomfördes senare. Övriga parametrar bestämdes genom simuleringar, och vi började med en grovinställning av r_0 . För att få roderutslag åt rätt håll

sattes r_0 negativ och dess storlek justerades så att rodrets

första utslag var av samma storleksordning som rodersignalen från en konventionell regulator. Då vi ökade tidsfördröjningen k minskade instabiliteten och för k=5 uppnåddes ett minimalt och stabilt roderutslag. Glömskefaktorn λ anpassades så att båda typerna av störningar klarades av hyggligt i initialskedet. Försök med andra samplingstider h gjordes, utan att förbättring kunde iaktas, varpå slutligen r_0 finjusterades. Observeras bör

FARTYGSSTYRNING

att den styrda båten är instabil, men att regulatorn klarar detta bra om r_0 väljes negativt. Simnon-programmet för den

adaptiva regulatorn vi inledningsvis använder (STURE1) finns i appendix D:1.

5.3 Girhastighetsstörningar

Simuleringar gjordes med girhastighetsstörningar och resultaten visas i figur 5.1. Man ser att andra störningen reglerades ut på bästa sätt, vilket också framgår av figur 5.1(c) där parametrarna i princip konvergerat efter ca 500s. Den långsamma divergens som synes i parameterskattningarna, och som också syns i simuleringar i [3], blir inte förbättrad om λ sätts till 1 för $t \geq 800$ s.

5.4 Sinusformade störningar

Först gjordes försök med vågor infallande från 70° . Man ser i figur 5.2 att efter ett insvängningsförlopp fram till $t \approx 1100$ s börjar regulatorn styra sämre igen. Glömskefaktorn λ sattes därför till 1 för $t \geq 1100$ s varigenom ett betydligt bättre uppförande hos regulatorn uppnåddes. Se figur 5.3. Regulatorn håller för denna attackvinkel kursen lika bra som en konventionell regulator men rodet ligger inte och slår alls så mycket (jfr figur 3.1(d)). Detta beror på att en adaptiv regulator till skillnad från en tillståndsregulator innehåller dynamik, vilken fungerar som ett lågpasfilter och alltså hindrar högfrekventa störningar från att slå igenom på rodersignalen.

Då vågorna kommer in från 160° blir styrningen problematisk med slående roder och periodiskt varierande kurs (figur 5.4). Observeras bör dock att roderutslaget är ungefär hälften av det den konventionella regulatorn lägger ut (jfr figur 3.2(c)). Försök med att genom ökad modellordning inkorporera störningen i skattningen gjordes. Resultatet, enl figur 5.5, blev snabbare konvergens men samma asymptotiska beteende.

Nästa försök att förbättra styrningen är att sampla oftare ty vi ligger nära Nyquistfrekvensen ($\omega/2$) med vågfrekvensen

ω_e . Då h sattes till 5s uppnåddes något lägre amplitud på

kurssvängningen men i gengäld ungefär dubbla roderutslaget (figur 5.6). Orsaken är att bandbredden i det ovan nämnda filtret ökar med minskad samplingstid.

FARTYGSSTYRNING

5.5 Vågidentifiering

Det stora problemet vid adaptiv fartygsstyrning är, vilket framgått av avsnitt 5.4, att reglera ut störningar som kommer in nästan akterifrån och således har mycket låg frekvens relativt båten. Försöket att genom ökad modellordning få med störningen i modellskattningen var framgångslöst. Vår ide är nu, att ändra modellen till att låta en sinusformig störning ingå i den, och att störningens amplitud och fas således skattas samtidigt med övriga parametrar. Modellen skulle därmed få följande utseende

$$y(t+k) = s_0 y(t) + s_1 y(t-1) + r_0 [u(t) + r_1' u(t-1)] + a_1 \sin \omega t + a_2 \cos \omega t \quad (5.11)$$

Parametrarna i denna skattas med minsta kvadratmetoden. I inledande försök antar vi att ω är känt men avsikten är att senare skatta även denna parameter. Resultatet av det inledande försöket (ω känt) ges av figur 5.7. Vi har i detta försök ändrat glömskefaktorn λ från 0.96 till 1.00 då parametrarna antagit ett någorlunda konstant värde ($t \geq 200s$). Parameterskattningen blir därmed konvergent och ser tilltalande ut. Om $\lambda=0.96$ genom hela simuleringen konvergerar däremot inte θ -vektorn. Skattningen av störningen ger emellertid inte någon förbättring för kursen, och snarare en försämring för rodervariationerna (jfr figur 5.4(b)). I appendix D:2 återfinns det Simnonprogram för den adaptiva regulatorn i vilken vågidentifieringen inkluderats (STUREW).

Det kan tänkas att skattningen av störningen inte blir speciellt bra vid vår låga samplingsfrekvens (samplingstid 10s) eftersom störningens periodtid är ungefär 25s. För att få en god skattning av störningsparametrarna vill vi sampla betydligt oftare än var 10:e sekund. Vi önskar att sampla ungefär en gång i sekunden. Att välja denna samplingstid i regulatorn skulle emellertid minska prediktionshorisonten vid skattningen av själva båtens parametrar och vi har tidigare funnit att detta ger en instabil reglering. Detta problem ska nu lösas inom ramen för våra simuleringsmöjligheter, dvs inom Simnon. Vi valde att åtminstone inledningsvis bryta ut vågidentifieringen ur regulatorn och göra ett system som med samplingstiden 1s klarar av vågidentifieringen och förser själva regulatorn, som identifierar parametrar i en första ordningens modell, med information om störningarna. Det program som utför vågidentifieringen vid känd vågfrekvens finns i appendix D:3. Vågidentifieringen lyckades nu, vilket framgår av figur 5.8(a), men fartyget krävde fortfarande ganska stora och kraftigt varierande roderutslag och lyckades inte heller hålla kursen bättre än tidigare. Se figurer 5.8(b) och 5.8(c).

FARTYGSSTYRNING

Vi har också provat att skatta vågfrekvensen och det gjorde vi helt enkelt genom att mäta tiden mellan konsekutiva maxima hos kursen. Parameterskattningarna konvergerade långsammare nu men frekvensskattningen lyckades, vilket framgår av figur 5.9. Vi satte initialvärdet för skattningen till 25s för att få bättre upplösning i figur 5.9(d) som visar frekvensskattningens konvergens. Programmet för denna utvidgade vågidentifiering finns i appendix D:4.

Efter de senaste simuleringarna, där vågidentifieringen i och för sig lyckades men där styrningen inte blev ett dugg bättre, frågar vi oss var modellen brister. Ett stort fel torde vara att vi vid utbrytningen av störningsmodellen förlorar den koppling vi bör ha mellan de olika parametrarna i form av kovarianstermer i P-matrisen.

5.6 Förslag till förbättrad vågidentifiering

Om vi nu inte vill förlora den nyss nämnda kopplingen mellan båtmodell och vågor står vi inför följande problem. Vi har en skattningsmodell

$$y(t) = \varphi(t)\theta(t) = \varphi_1(t)\theta_1(t) + \varphi_2(t)\theta_2(t) \quad (5.12)$$

där vi vill uppdatera θ_2 varje sekund för att få en bra vågidentifiering och θ_1 var 10:e sekund för att få en tillräckligt avlägsen prediktionshorisont.

Förslagsvis kan problemet lösas genom att vi utför skattning av hela modellen var 10:e sekund

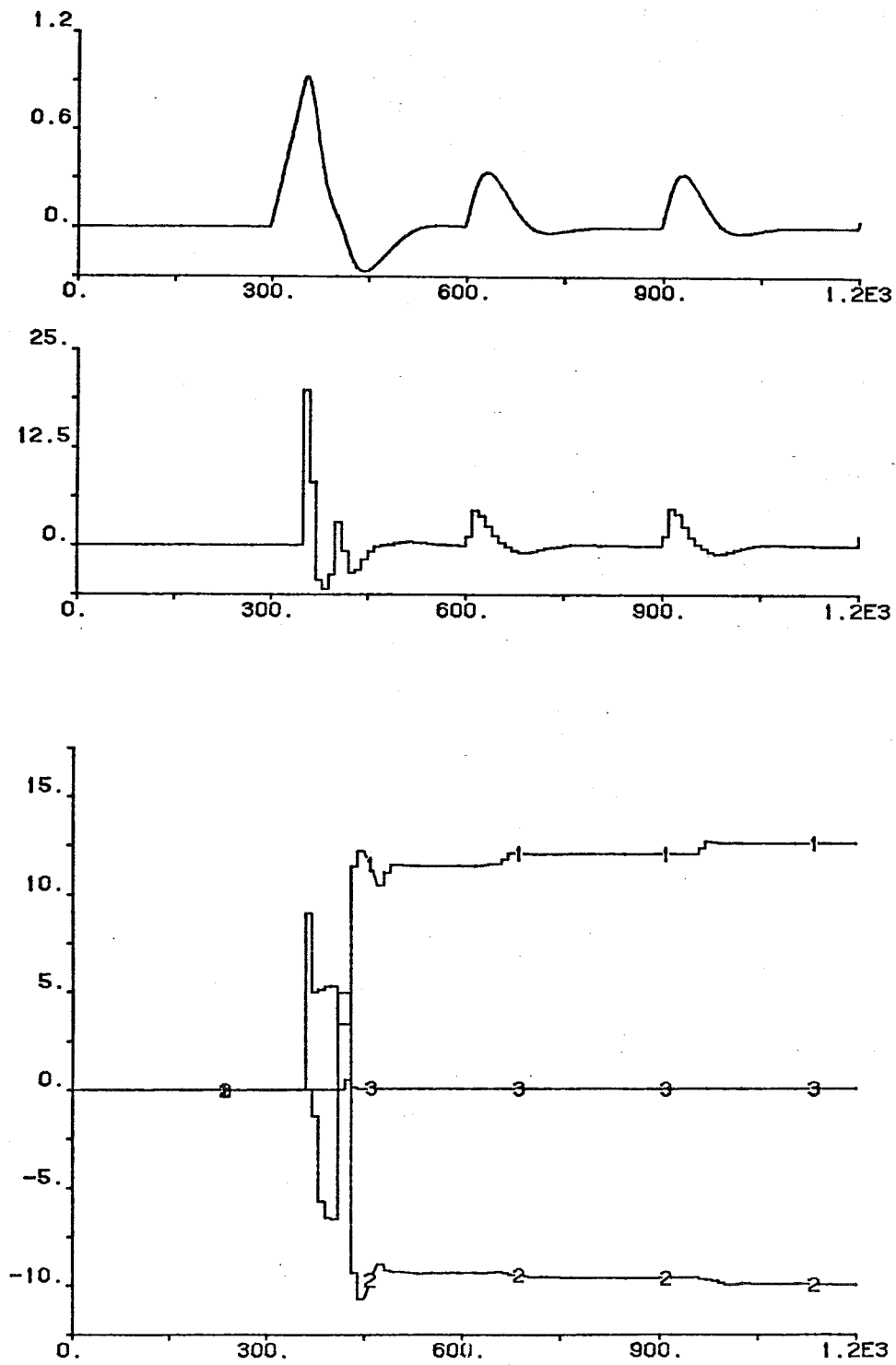
$$\begin{cases} \theta(t+10) = \theta(t) + P(t+10)\varphi(t+10)\epsilon(t+10) \\ \epsilon(t+10) = y(t+10) - \theta(t)\varphi(t+10) \\ P(t+10) \text{ enl (5.8)} \end{cases} \quad (5.13)$$

och av våginverkan varje sekund enl

$$\begin{cases} \theta_2(t+1) = \theta_2(t) + P_2(t+1)\varphi_2(t+1)\epsilon(t+1) \\ \epsilon(t+1) = y(t+1) - \theta_1(t)\varphi_1'(t+1) - \theta_2(t)\varphi_2(t+1) \\ P(t+1) \text{ enl (5.8)} \end{cases} \quad (5.14)$$

där P_2 är en undermatris till P och $\theta_1'(t)$ står för en under 10s konstant parametervektor.

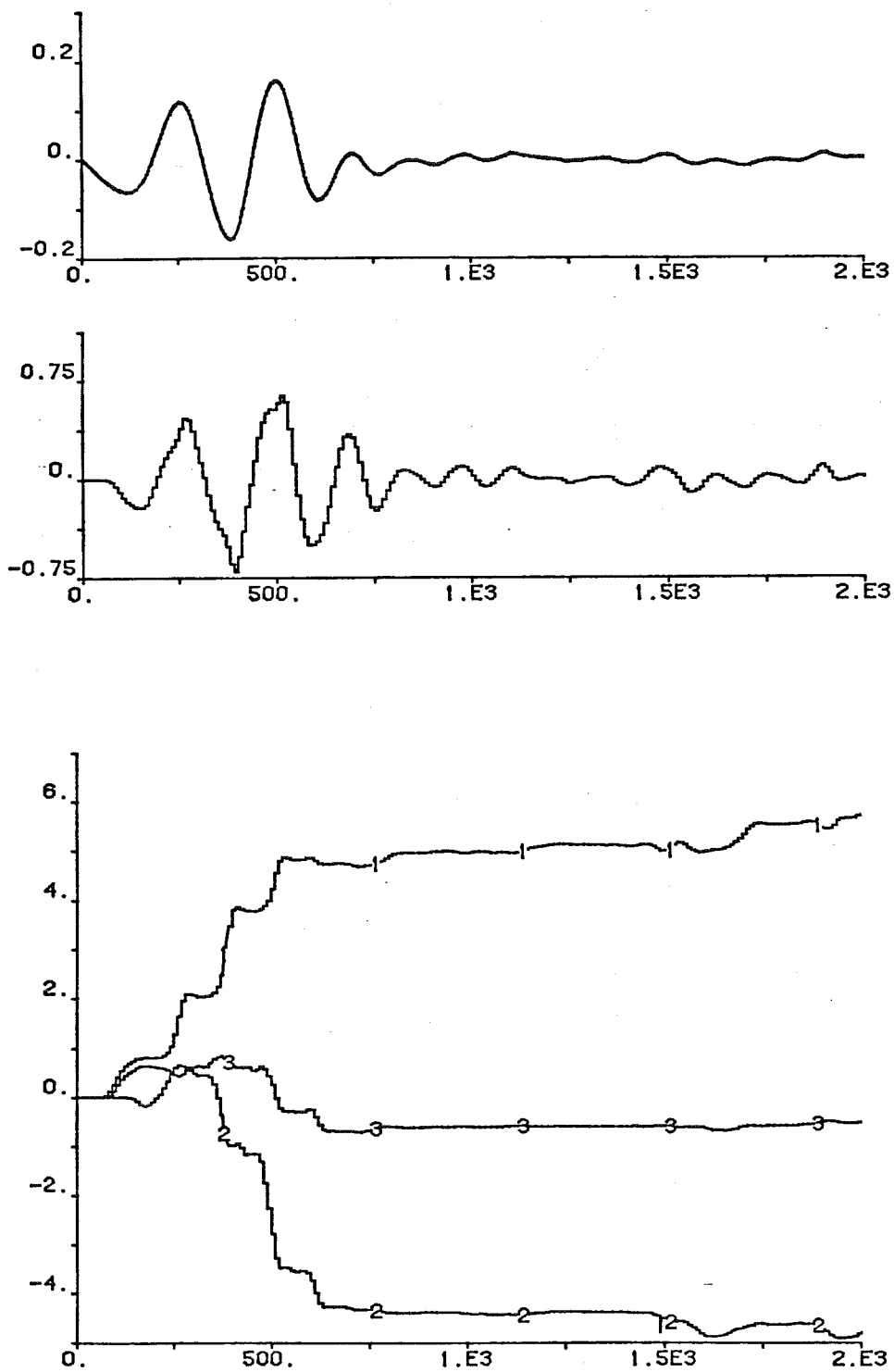
Då uppdateringen av φ_1 -vektorn varje sekund kräver att man lagrar avsevärda mängder mätvärden kan eventuellt även denna ersättas med en φ_1' -vektor som endast uppdateras var 10:e sekund.



figur 5.1 Girhastighetsstörning på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1)

- (a) Kurs (grader)
- (b) Roderutslag (grader)
- (c) Parameterskattningar

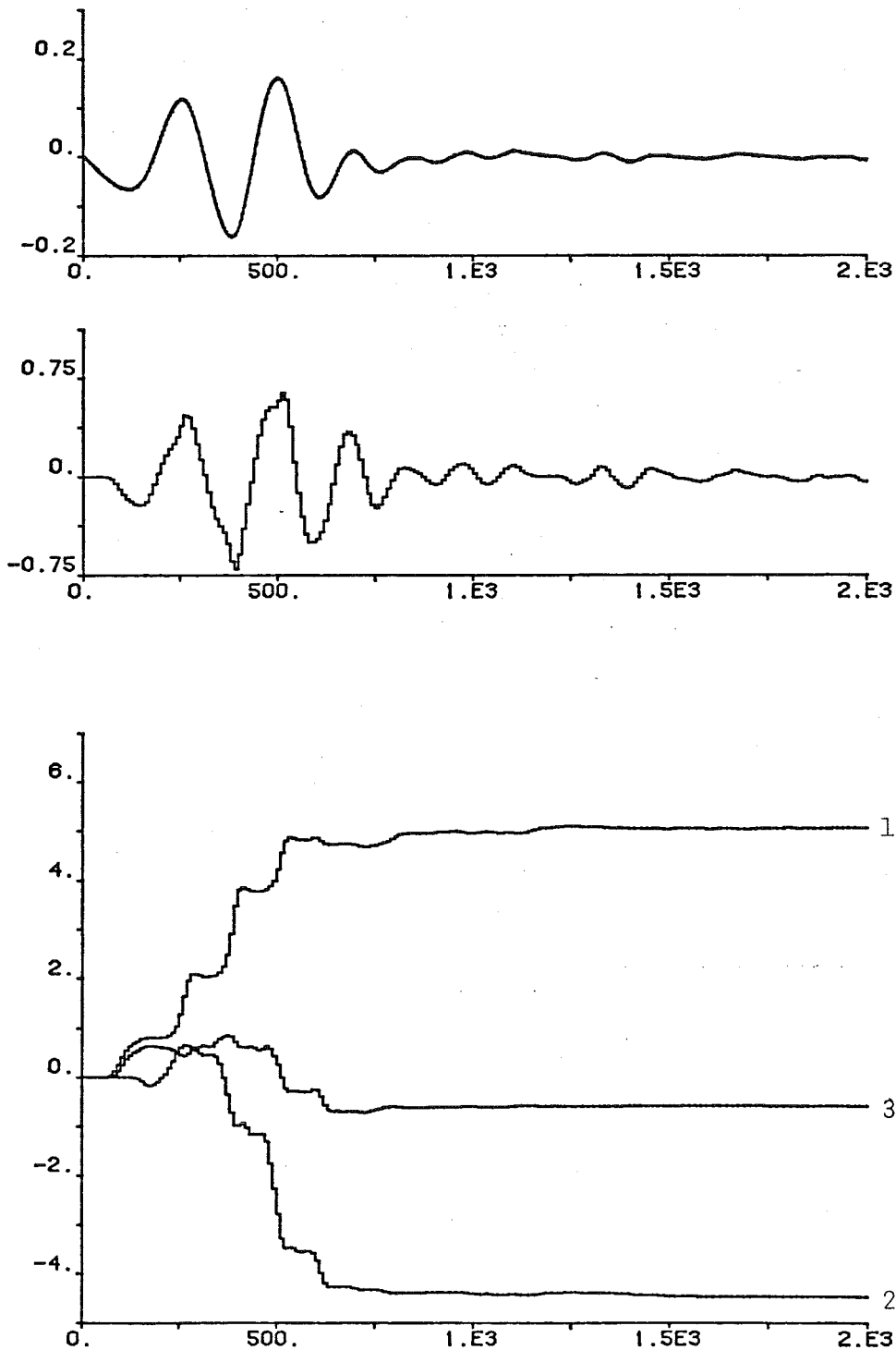
- 1) θ_1
- 2) θ_2
- 3) θ_4



figur 5.2 Sinusformad störning (70°) på
 Nomoto-modell styrd med
 adaptiv regulator (STURE1)

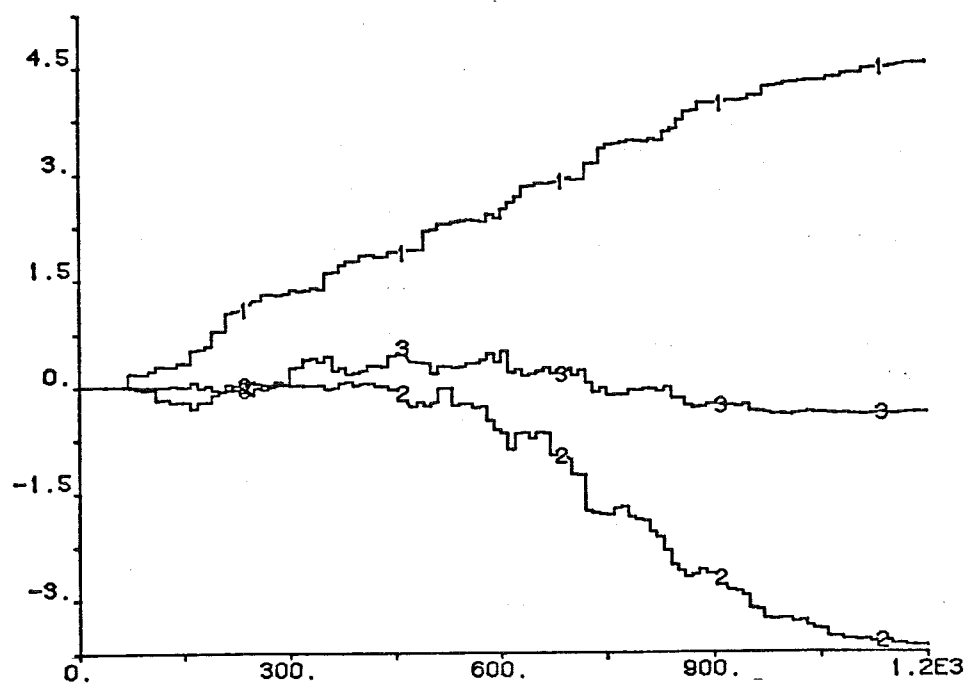
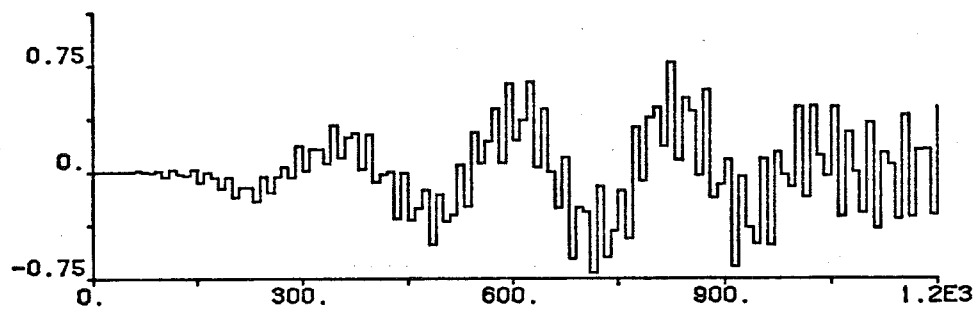
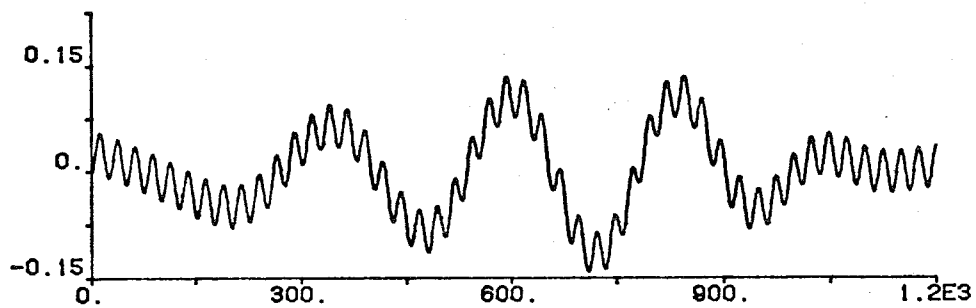
(a) Kurs (grader)
 (b) Roderutslag (grader)
 (c) Parameterskattningar

1) θ_1
 2) θ_2
 3) θ_4



figur 5.3 Sinusformad störning (70°) på Nomoto-modell styrd med adaptiv regulator (STURE1) där glömskefaktorn=1 då $t > 1100s$

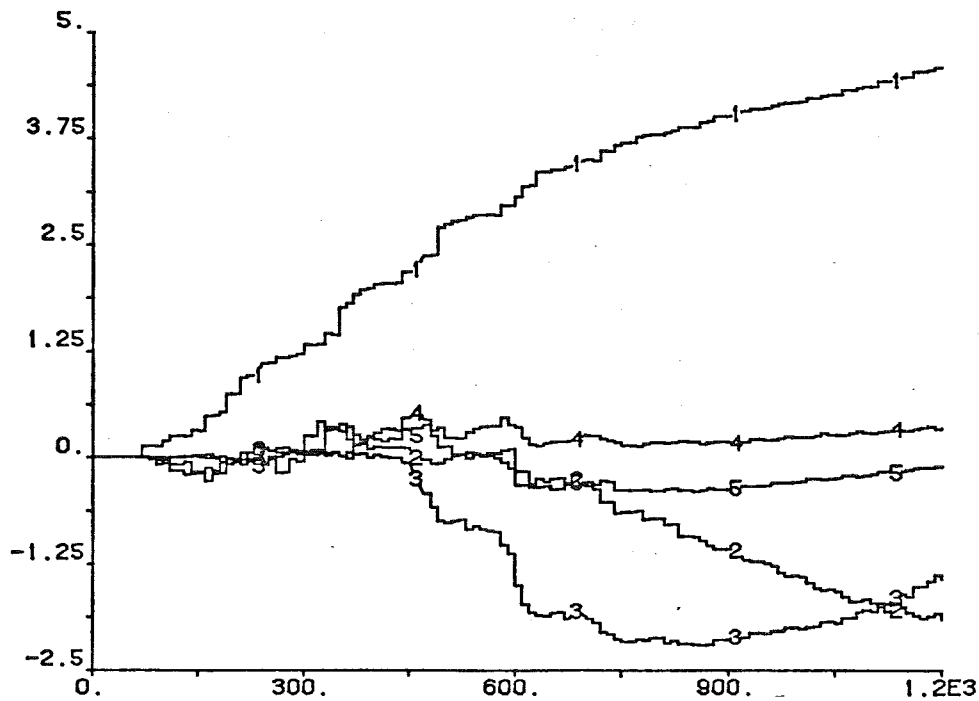
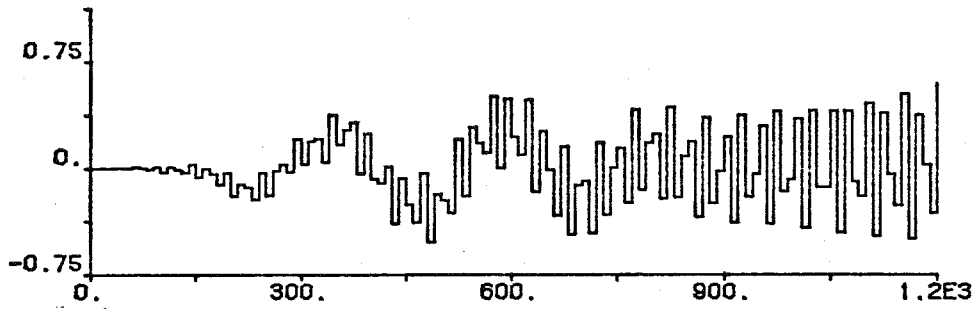
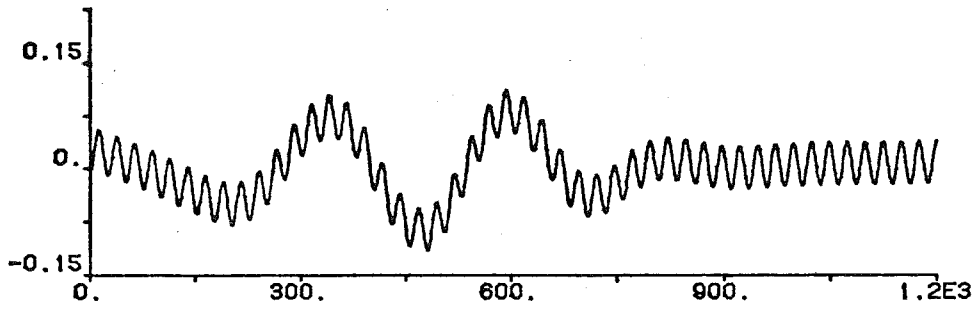
- (a) Kurs (grader)
 (b) Roderutslag (grader)
 (c) Parameterskattningar
 1) θ_1
 2) θ_2
 3) θ_4



figur 5.4 Sinusformad störning (160°) på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1)
Modellordning 1

- (a) Kurs (grader)
(b) Roderutslag (grader)
(c) Parameterskattningar

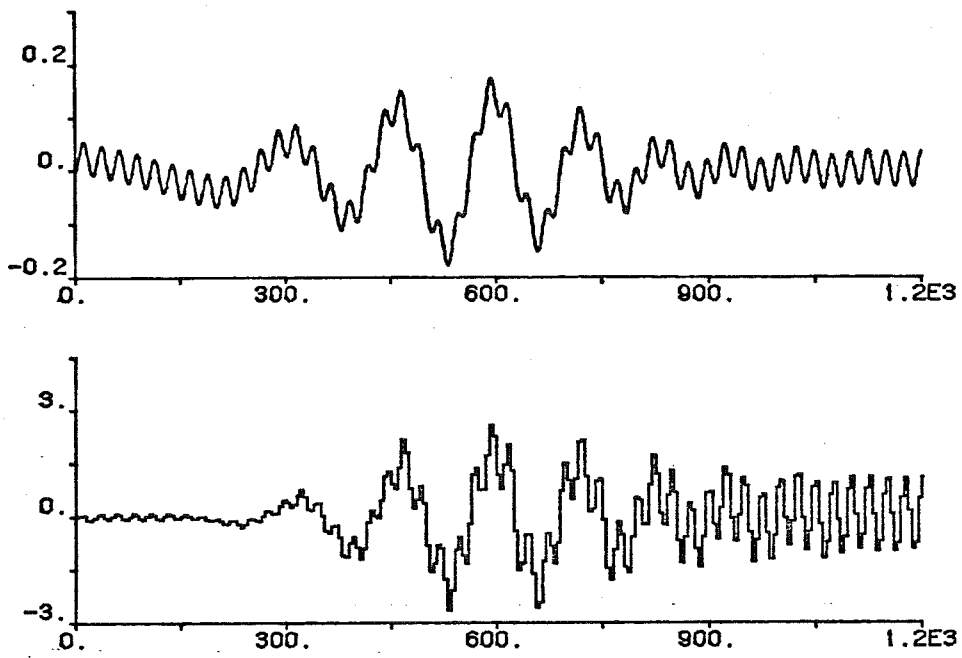
- 1) θ_1
2) θ_2
3) θ_4



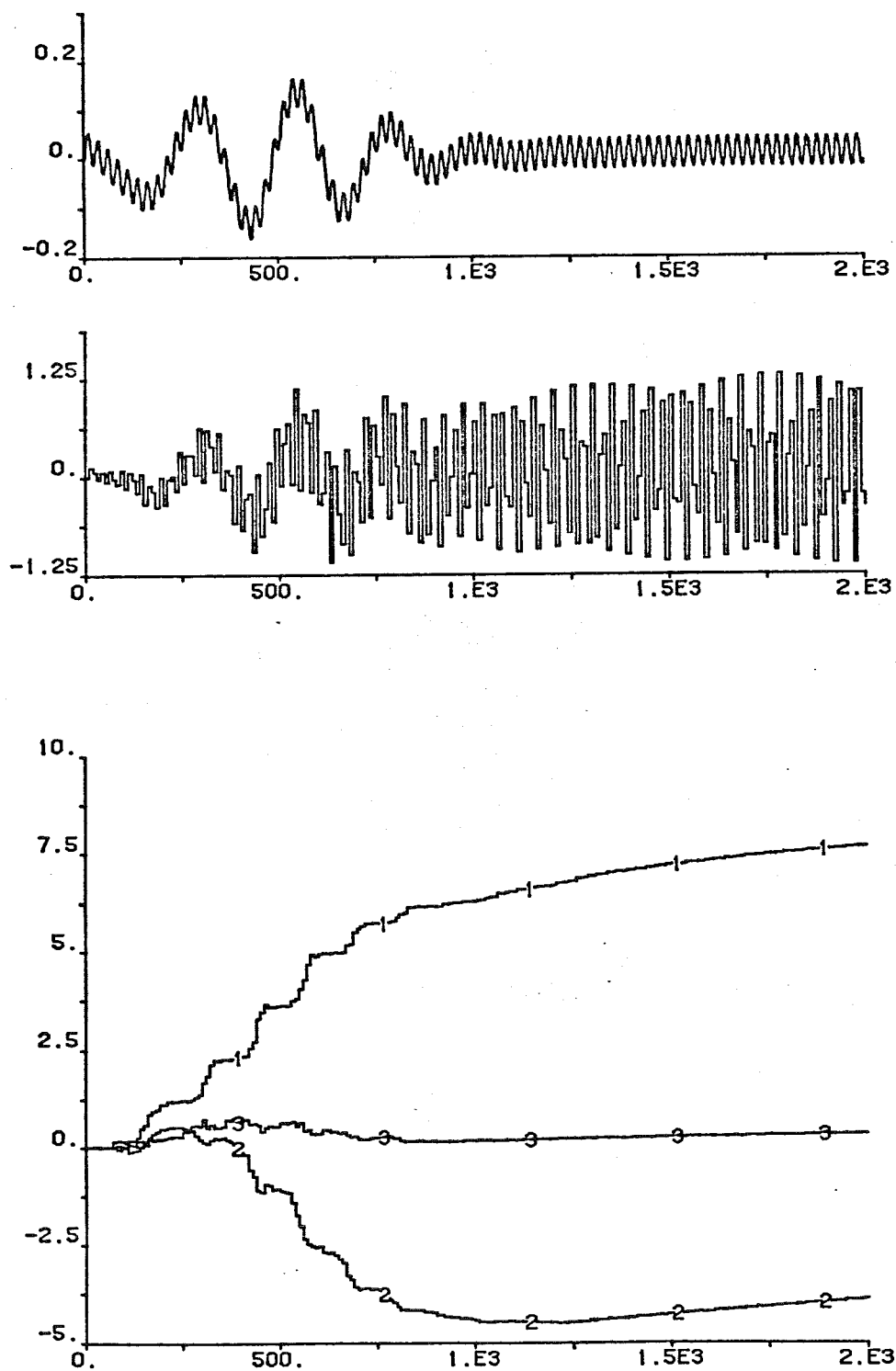
figur 5.5

Sinusformad störning (160°) på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1)
Modellordning 2

- (a) Kurs (grader)
- (b) Roderutslag (grader)
- (c) Parameterskattningar
 - 1) θ_1
 - 2) θ_2
 - 3) θ_4



figur 5.6 Sinusformad störning (160°) på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1)
Samplingstid 5s
(a) Kurs (grader)
(b) Roderutslag (grader)

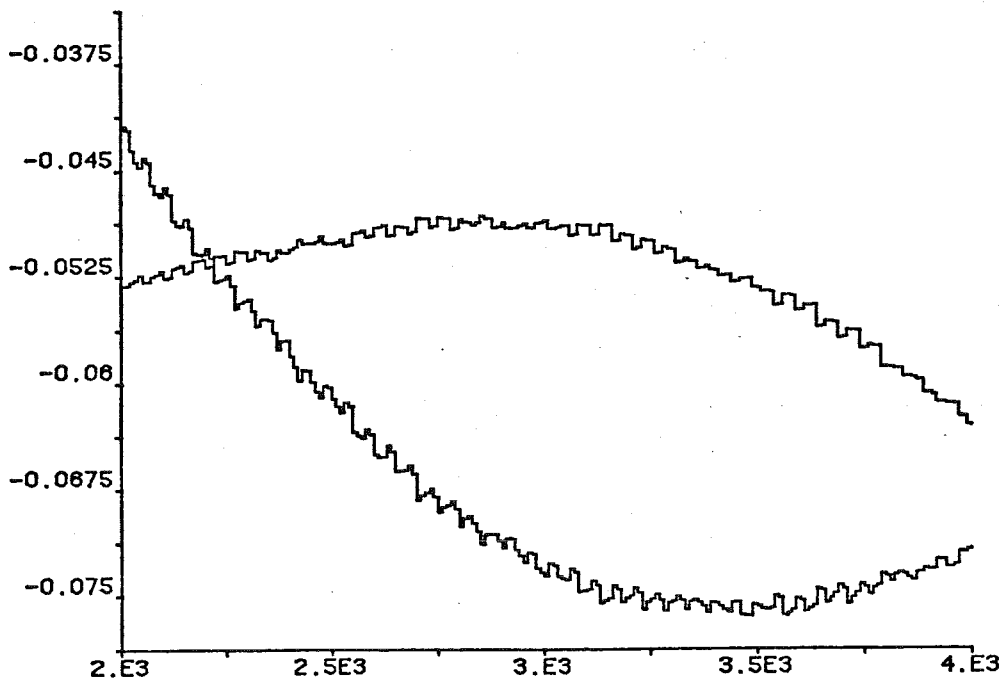
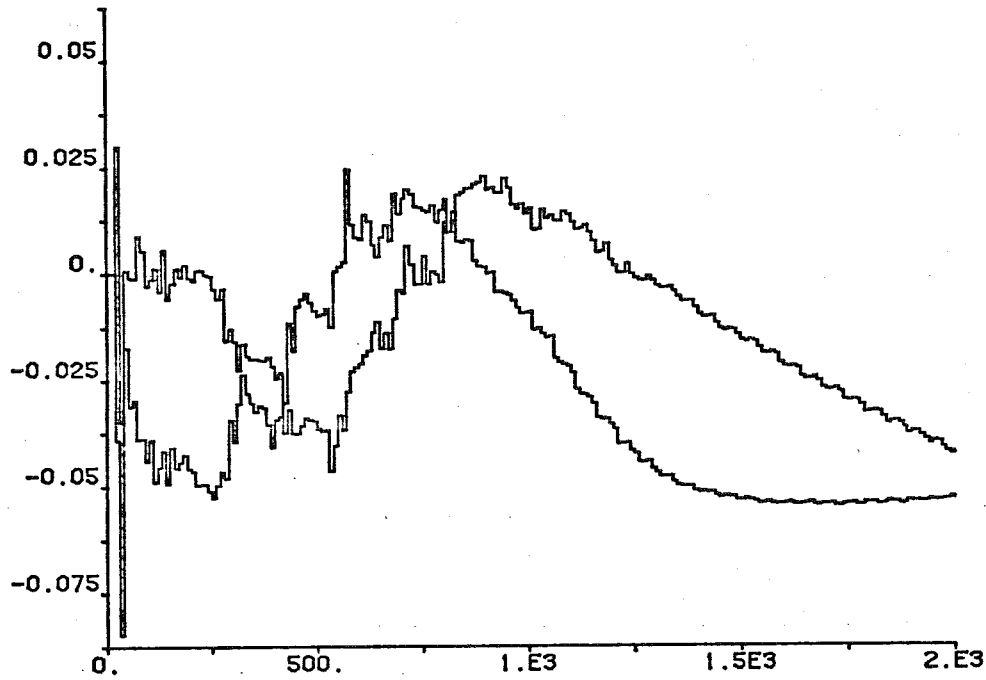


figur 5.7

Sinusformad störning (160°) på
 Nomoto-modell styrd med
 adaptiv regulator (STUREW) med
 intern vågskattning (ω känt)

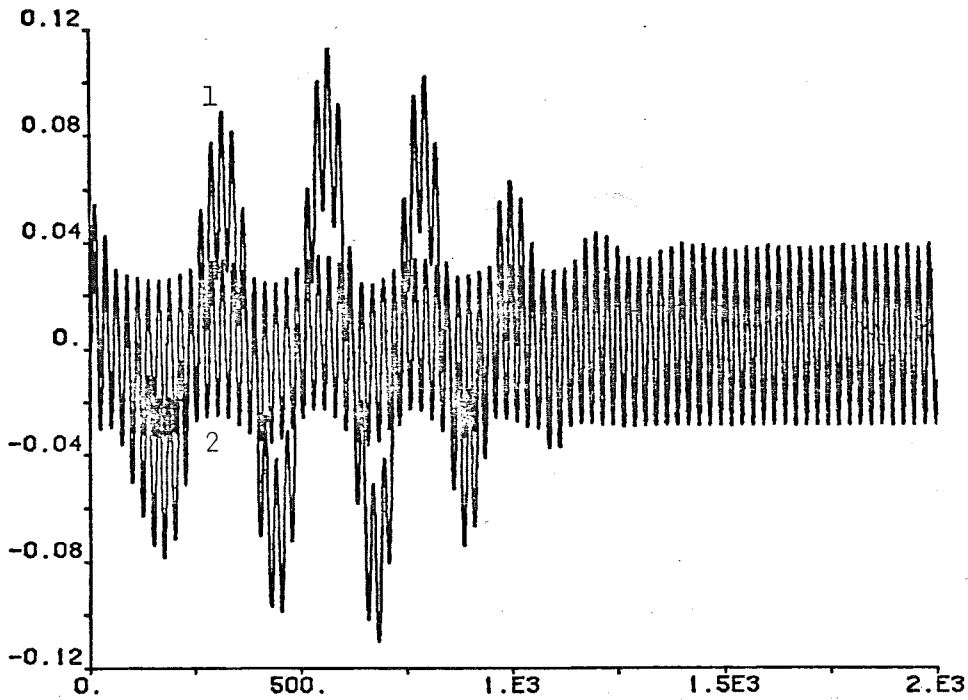
- (a) Kurs (grader)
- (b) Roderutslag (grader)
- (c) Parameterskattningar

- 1) θ_1
- 2) θ_2
- 3) θ_4

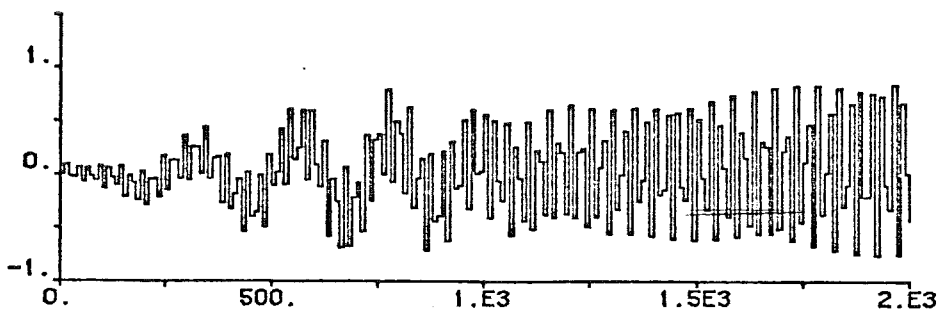
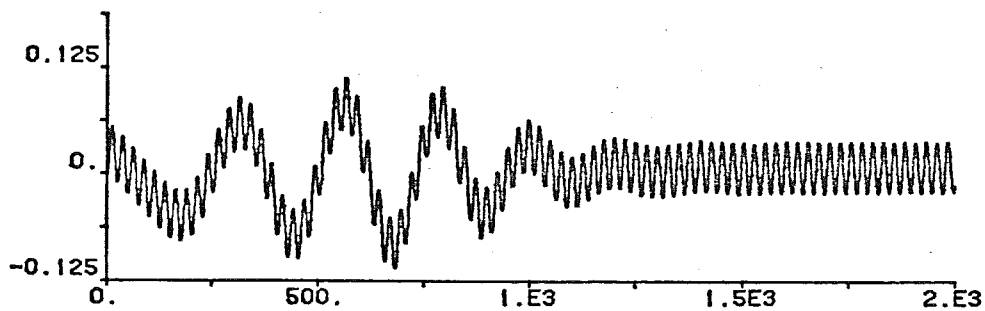


figur 5.7 Sinusformad störning (160°) på Nomoto-modell styrd med adaptiv regulator (STUREW) med intern vågskattning (ω känt)
Parameterskattningar - θ_3 och θ_5

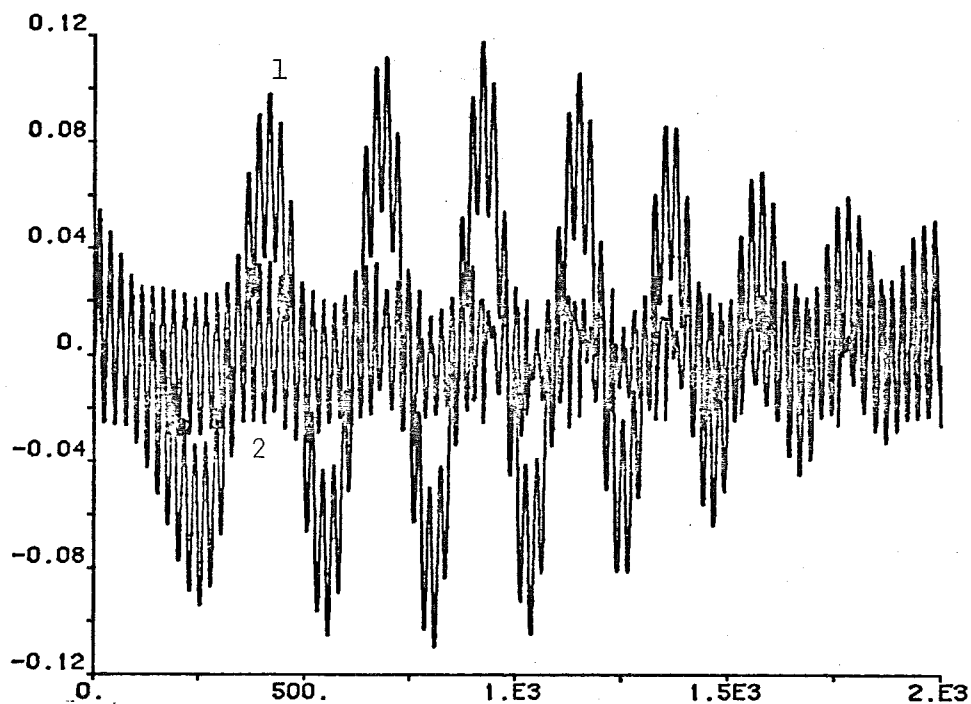
(d) $0 < t < 2000s$
(e) $2000s < t < 4000s$



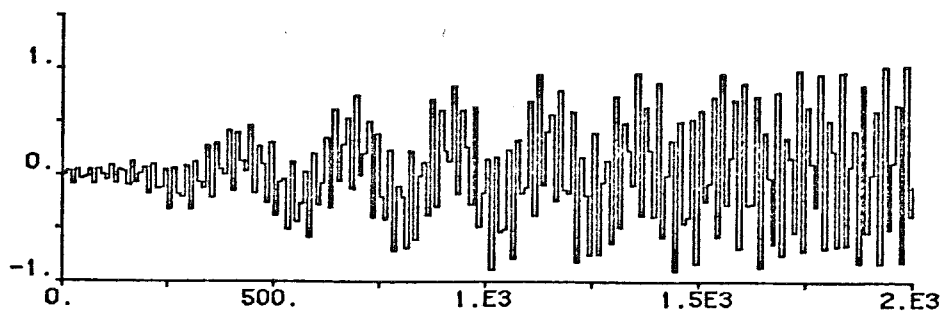
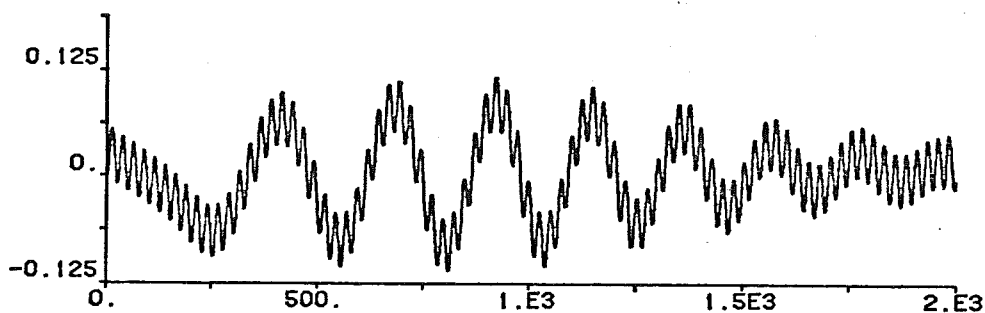
figur 5.8(a) Sinusformad störning (160°) på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1) med
extern vågskattning (ω känt)
1) Verklig kurs (grader)
2) Skattad kurs (grader)



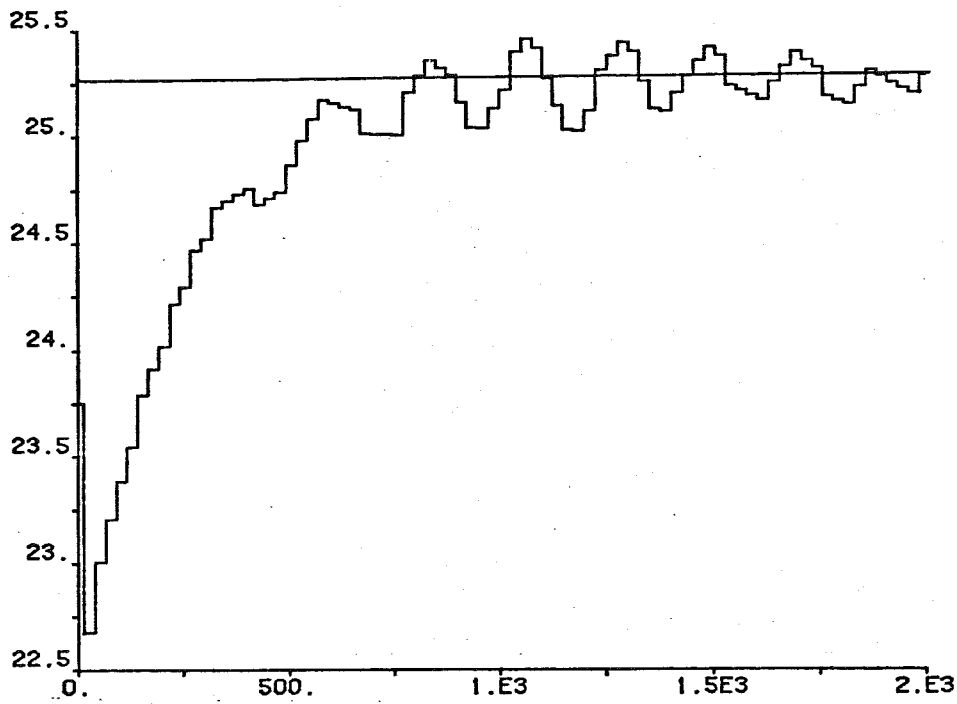
figur 5.8 Sinusformad störning (160°) på
Nomoto-modell styrd med
adaptiv regulator (STURE1) med
extern vågskattning (ω känt)
(b) Kurs (grader)
(c) Roderutslag (grader)



figur 5.9(a) Sinusformad störning (160°) på Nomoto-modell styrd med adaptiv regulator (STURE1) med extern vågskattning (ω okänt)
 1) Verklig kurs (grader)
 2) Skattad kurs (grader)



figur 5.9 Sinusformad störning (160°) på Nomoto-modell styrd med adaptiv regulator (STURE1) med Extern vågskattning (ω okänt)
 (b) Kurs (grader)
 (c) Roderutslag (grader)



figur 5.9(d) Sinusformad störning (160°) på Nomoto-modell styrd med adaptiv regulator (STURE1) med extern vågskattning (ω okänt)

6. Sammanfattning

6.1 Kommentarer till resultaten

I kapitel 3 presenteras resultat från styrning med tillståndsåterkoppling då alla tillstånd är mätbara. Dessa resultat låter vi vara referensresultat. Försöken med Kalmanfilter gav utomordentligt god rekonstruktion av tillstånden, så länge vi inte försökte ta hänsyn till effekterna från systematiska fel i inställning av rodet. Om de adaptiva regulatorerna kan följande sägas. För att uppnå ett hyggligt beteende hos regulatorn ågnade vi inledningsvis en del tid åt att välja en standarduppsättning regulatorparametrar. Då simuleringarna uppvisar samma fenomen vid lågfrekvent sjö som observerats i verkligheten, kan våra modeller anses vara tillräckliga i det avseendet. Det skall också nämnas att de roderutslag som krävdes för en viss kursstabilitet är mindre än vid konventionell reglering. Förklaringen är att den adaptiva regulatorn innehåller dynamik. Vid mera högfrekvent sjö och vid girhastighetsstörningar fungerar regulatorn förträffligt. Vi har försökt att skatta de lågfrekventa störningarna och lyckats bra med detta, men vårt införande av denna skattning i regulatorn har inte medfört någon förbättrad reglering.

6.2 Framåtblickar

Det förslag vi presenterat i avsnitt 5.6 hoppas och tror vi ska leda till bättre störningsskattning och därmed också bättre kursstabilitet. Man kan även tänka sig att typen av adaptiv regulator inte har varit lämplig och att någon annan typ kan ge bättre resultat. Dessutom bör man undersöka andra metoder för frekvensskattning som kan ge snabbare konvergens. I samband med detta bör man också studera hur frekvensskattningen uppför sig vid stora girar dvs då frekvensen ändras.

Vi blir naturligtvis glada, om vi kan dela med oss av våra erfarenheter till dem som eventuellt tänker arbeta vidare där vi lämnat problemen, eller om vi på något annat sätt får höra från intresserade.

```

CONTINUOUS SYSTEM PROC
"FILE CALLED SHIP3W
"THREE STATE MODEL WITH REGULAR WAVE DISTURBANCE
"
"AUTHOR SRAF 800617
"
INPUT DELTA
"DELTA = RUDDER ANGLE [DEG]
"
OUTPUT RDEG PSIDEG ALF K
"RDEG = TURNING RATE [DEG/S]
"PSIDEG = HEADING ANGLE [DEG]
"
STATE V R PSI
"V = SWAY VELOCITY [M/S]
"R = TURNING RATE [RAD/S]
"PSI = HEADING ANGLE [RAD]
"
DER DV DR DPSI
"
TIME T
"
INITIAL
ALFA=180/PI
RHO1=2
G1 =G/(U*U/L)
W1 =W/L
L1 =L/L
U1 =U/U
T1 =D/L
H =0.015*VT*VT+1.5
H1 =H/L
TW =-0.0014*VT*VT*VT+0.042*VT*VT+5.6
TW1 =TW/(L/U)
OMEGA =2*PI/TW
OMEGA1=OMEGA/(U/L)
SIGMA =OMEGA*OMEGA/G
SIGMA1=SIGMA/(1/L)
GAMMA =GAMMAW/ALFA-PI
A=RHO1*G1*(1-EXP(-SIGMA1*T1))/(SIGMA1*SIGMA1)
MO1=MO*IZ/(U/L*U/L)
DET=L*MYV*IZNR-L*MXGYR*MXGNV
"
OUTPUT
RDEG=ALFA*R
PSIDEG=ALFA*PSI
"
"' DYNAMICS'
CHI=PSI-GAMMA
OMEGAE=OMEGA1-SIGMA1*(U1*COS(CHI)-V/U*SIN(CHI))
OMET=OMEGAE*T/(L/U)
S=SIGMA1*H1/2*SIN(OMET)
KSI=H1/2*COS(OMET)
B=SIGMA1*L1/2*COS(CHI)
C=SIGMA1*W1/2*SIN(CHI)
YT=IF ABS(B)<EPS THEN SIN(C) ELSE SIN(B)*SIN(C)/B
NT1=IF ABS(C)<EPS THEN -C/3 ELSE (C*COS(C)-SIN(C))/(C*C)
NT2=IF ABS(B)<EPS THEN -B/3 ELSE (B*COS(B)-SIN(B))/(B*B)
YOF1=-2*A*L1*YT*S
NOF1=A*SIGMA1*(W1*W1*SIN(B)*NT1-L1*L1*SIN(C)*NT2)*KSI
M1=IF MOD(T,MPER)>MPER-MDUR THEN MO1 ELSE 0
YOF2=0
NOF2=M1/ALFA
YO=IF FLAG<2 THEN YOF1 ELSE YOF2
NO=IF FLAG<2 THEN NOF1 ELSE NOF2
"

```

```

A11=L*(IZNR*YV-NV*MXGYR)/DET
A12=L*(IZNR*YRM-NRMXG*MXGYR)/DET
A21=L*(-MXGNV*YV+NV*MYV)/DET
A22=L*(-YRM*MXGNV+NRMXG*MYV)/DET
B11=L*(IZNR*YD-MXGYR*ND)/DET
B21=L*(MYV*ND-MXGNV*YD)/DET
F11=L*IZNR/DET
F12=-L*MXGYR/DET
F21=-L*MXGNV/DET
F22=L*MYV/DET
A1=-A11-A22
A2=A11*A22-A21*A12
B1=B21
B2=A21*B11-A11*B21
TB=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (A1/A2-B1/B2) ELSE 1
KB=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (B2/A2/TB) ELSE B2/A1
ALF1=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (1/TB) ELSE A2/A1
ALF=ALF1*(U/L)
K=KB*(U/L*U/L)
"

```

DYNAMICS

```

QV=A11*(U/L)*V+A12*(U)*R+B11*(U*U/L)*DELTA/ALFA
DV=QV+F11*(U*U/L)*YD+F12*(U*U/L)*ND
QR=A21*(U/L/L)*V+A22*(U/L)*R+B21*(U/L*U/L)*DELTA/ALFA
DR=QR+F21*(U/L*U/L)*YD+F22*(U/L*U/L)*ND
DPSI=R
"

```

"CONSTANTS

```

PI:3.1415926535
G :9.8065
"

```

```

IZ :0.00046
IZNR :0.00083
MYV :0.01407
MXGYR:0
NRMXG:-0.00145
MXGNV:0
YRM :-0.00631
YV :-0.00607
NV :-0.00164
YD :0.00203
ND :-0.00095
"

```

"PARAMETERS

```

EPSDET:1.E-6
EPS:1.E-3
U :8 "SPEED [M/S]
L :350 "LENGTH [M]
W :60 "BREADTH [M]
D :10.5 "DRAUGHT [M]
VT:5 "WIND SPEED [M/S]
GAMMAW:160 "DIRECTION OF WAVE PROPAGATION [DEG]
MD:0.03 "TORQUE DISTURBANCE [DEG/S/S]
MPER:300 "TORQUE INTERVALL [S]
MDUR:5 "TORQUE DURATION [S]
FLAG:2 "FLAG<2 SINUSOIDAL WAVES
"FLAG>1 TORQUE DISTURBANCE
END

```

```

CONTINUOUS SYSTEM PROC
"FILE CALLED SHIP2W
"
" TWO STATE MODEL WITH REGULAR WAVE DISTURBANCE
"
"AUTHOR SRAF 800617
"
INPUT DELTA
"DELTA = RUDDER ANGLE [DEG]
"
OUTPUT RDEG PSIDEG ALF K
"RDEG = TURNING RATE [DEG/S]
"PSIDEG = HEADING ANGLE [DEG]
"
STATE R PSI
"R = TURNING RATE [RAD/S]
"PSI = HEADING ANGLE [RAD]
"
DER DR DPSI
"
TIME T
"
INITIAL
ALFA=180/PI
RH01=2
G1 =G/(U*U/L)
W1 =W/L
L1 =L/L
U1 =U/U
T1 =D/L
H =0.015*VT*VT+1.5
H1 =H/L
TW =-0.0014*VT*VT*VT+0.042*VT*VT+5.6
TW1 =TW/(L/U)
OMEGA =2*PI/TW
OMEGA1=OMEGA/(U/L)
SIGMA =OMEGA*OMEGA/G
SIGMA1=SIGMA/(1/L)
GAMMA=GAMMAW/ALFA-PI
A=RHO1*G1*(1-EXP(-SIGMA1*T1))/(SIGMA1*SIGMA1)
MO1=MO*IZ/(U/L*U/L)
DET=L*MYV*IZNR-L*MXGYR*MXGNV
"
OUTPUT
RDEG =ALFA*R
PSIDEG=ALFA*PSI
"
"' DYNAMICS'
CHI=PSI-GAMMA
OMEGAE=OMEGA1-SIGMA1*U1*COS(CHI)
OMET=OMEGAE*T/(L/U)
S=SIGMA1*H1/2*SIN(OMET)
KSI=H1/2*COS(OMET)
B=SIGMA1*L1/2*COS(CHI)
C=SIGMA1*W1/2*SIN(CHI)
YT=IF ABS(B)<EPS THEN SIN(C) ELSE SIN(B)*SIN(C)/B
NT1=IF ABS(C)<EPS THEN -C/3 ELSE (C*COS(C)-SIN(C))/(C*C)
NT2=IF ABS(B)<EPS THEN -B/3 ELSE (B*COS(B)-SIN(B))/(B*B)
YOF1=-2*A*L1*YT*S
NOF1=A*SIGMA1*(W1*W1*SIN(B)*NT1-L1*L1*SIN(C)*NT2)*KSI
M1=IF MOD(T,MPER)>MPER-MDUR THEN MO1 ELSE 0
YOF2=0
NOF2=M1/ALFA
YO=IF FLAG<2 THEN YOF1 ELSE YOF2
NO=IF FLAG<2 THEN NOF1 ELSE NOF2
"

```

```

A11=L*(IZNR*YV-NV*MXGYR)/DET
A12=L*(IZNR*YRM-NRMXG*MXGYR)/DET
A21=L*(-MXGNV*YV+NV*MYV)/DET
A22=L*(-YRM*MXGNV+NRMXG*MYV)/DET
B11=L*(IZNR*YD-MXGYR*ND)/DET
B21=L*(MYV*ND-MXGNV*YD)/DET
F11=L*(IZNR*YD-MXGYR*ND)/DET
F21=L*(-MXGNV*YD+MYV*ND)/DET
A1=-A11-A22
A2=A11*A22-A21*A12
B1=B21
B2=A21*B11-A11*B21
F1=F21
F2=A21*F11-A11*F21
TB=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (A1/A2-B1/B2) ELSE 1
F1F2=IF FLAG<2 AND ABS(F2)>EPSDET THEN F1/F2 ELSE 0
TF=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (A1/A2-F1F2) ELSE 1
KB=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (B2/A2/TB) ELSE B2/A1
X=ABS(A2)>EPSDET AND ABS(F1)>EPSDET AND ABS(F2)>EPSDET
Y=ABS(A2)>EPSDET AND ABS(F1)>EPSDET AND ABS(F2)<EPSDET
Z=ABS(A2)>EPSDET AND ABS(F1)<EPSDET AND ABS(F2)<EPSDET
KF=IF X THEN F2/A2/TF ELSE IF Y THEN -F2*F2/A2/F1 ELSE IF Z THEN 0 ELSE F2/A1
ALF1=IF ABS(A2)>EPSDET THEN (1/TB) ELSE A2/A1
ALF=ALF1*(U/L)
K=KB*(U*U/L/L)
"
DYNAMICS
DR=-ALF*R+K*DELTA/ALFA+KF*(U/L*U/L)
DPSI=R
"
"CONSTANTS
PI:3.1415926535
G :9.8065
"
IZ :0.00046
IZNR :0.00083
MYV :0.01407
MXGYR:0
NRMXG:-0.00145
MXGNV:0
YRM :-0.00631
YV :-0.00607
NV :-0.00164
YD :0.00203
ND :-0.00095
"
"PARAMETERS
EPSDET:1.E-6
EPS:1.E-3
U :8 "SPEED [M/S]
L :350 "LENGTH [M]
W :60 "WIDTH [M]
D :10.5 "DRAUGHT [M]
VT:5 "WIND SPEED [M/S]
GAMMAW:160 "DIRECTION OF WAVE PROPAGATION [DEG]
MO:0.03 "TORQUE DISTURBANCE [DEG/S/S]
MPER:300 "TORQUE INTERVAL [S]
MDUR:5 "TORQUE DURATION [S]
FLAG:2 "FLAG<2 SINUSOIDAL WAVES
"FLAG>1 TORQUE DISTURBANCE
END

```

```
CONTINUOUS SYSTEM PROC
"FILE CALLED SHIP3
"LINEAR MODEL - TEST PROGRAM
"
"800610
"
INPUT DELTA
"DELTA = RUDDER ANGLE [DEG]
OUTPUT RDEG PSIDEG
"RDEG = TURNING RATE [DEG/S]
"PSIDEG = HEADING ANGLE [DEG]
STATE V R PSI
"V = SWAY VELOCITY [M/S]
"R = TURNING RATE [RAD/S]
"PSI=HEADING ANGLE [RAD]
DER DV DR DPSI
"-names OF THE DERIVATIVES
"
INITIAL
ALFA=180/PI
OUTPUT
RDEG=ALFA*R
PSIDEG=ALFA*PSI
"
DYNAMICS
DV=A11*V+A12*R+B1*DELTA/ALFA
DR=A21*V+A22*R+B2*DELTA/ALFA
DPSI=R
"
"CONSTANTS
PI:3.1415926535
U :11 "BOAT'S FORWARD VELOCITY [M/S]
L :300 "LENGTH OF THE BOAT [M]
"
A11:-0.6807
A12:-0.2814
A21:-1.392
A22:-2.01
B1:0.1691
B2:-1.74
"
END
```

```
CONTINUOUS SYSTEM REG
"FILE CALLED STREGCO
"REGULATOR USING STATE FEEDBACK FROM THE NOMOTO MODEL
"
"AUTHOR SRAF 800617
"
INPUT R PSI ALF K
"R = TURNING RATE [DEG/S]
"PSI= HEADING ANGLE [DEG]
"
OUTPUT U
"U = RUDDER COMMAND [DEG]
"
INITIAL
ROTRHO=SQRT(RHO)
"
OUTPUT
L1=SIGN(K)*SQRT(ALF*ALF/K/K+2/ABS(K)/ROTRHO)-ALF/K
L2=SIGN(K)/ROTRHO
U=-L1*R-L2*PSI
"
"PARAMETERS
RHO=0.1
"
END
```

```
DISCRETE SYSTEM REG
"FILE CALLED STREGDI
"
"DISCRETE STATE FEEDBACK REGULATOR FOR NOMOTO MODEL
"
"AUTHOR SRAF 800722
"
INPUT R PSI ALF K
"R = TURNING RATE [DEG/S]
"PSI = HEADING ANGLE [DEG]
"
OUTPUT U
"U = RUDDER ANGLE [DEG]
"
TIME T
TSAMP TS
"
OUTPUT
U=-L1*R-L2*PSI
"
DYNAMICS
TS=T+H
"
"PARAMETERS
L1:-183.3046
L2:-2.665297
H :10 "SAMPLING PERIOD [S]
"
END
```



```

CONTINUOUS SYSTEM FILTER
"FILE CALLED KALMANCO
"
"CONTINUOUS KALMAN FILTER
"
"AUTHOR SRAF 800721
"
INPUT PSI DELTA ALF KB
"PSI   = HEADING ANGLE [DEG]
"DELTA = RUDDER ANGLE [DEG]
"
OUTPUT REST
"REST   = ESTIMATED YAW RATE           [DEG/S]
"
STATE RROOF PSIROOF
"RROOF   = ESTIMATED YAW RATE           [RAD/S]
"PSIROOF = ESTIMATED HEADING ANGLE [RAD]
"
DER DRRROOF DPSIROOF
"
INITIAL
ALFA=180/PI
HVT =0.015*VT*VT  +1.5
HVTO=0.015*VTO*VTO+1.5
R1=R10*(HVT/HVTO*HVT/HVTO)
K1=SQRT(R1/R2)
K2=SQRT(SQRT(4*R1/R2))
"
OUTPUT
REST=RROOF*ALFA
"
DYNAMICS
PSIDIFF=PSI/ALFA-PSIROOF
DRROOF=-ALF*RROOF+KB*DELTA/ALFA+K1*PSIDIFF
DPSIROOF=RROOF+K2*PSIDIFF
"
"CONSTANTS
PI:3.1415926535
VTO:10           "WIND SPEED AT EXPERIMENT           [M/S]
R10:0.0078       "PROCESS DISTURBANCE AT EXPERIMENT      [DEG2]
"
"PARAMETERS
VT:5             "WIND SPEED                               [M/S]
R2:0.0025        "HEADING ANGLE MEASUREMENT NOISE [DEG2]
"
END

```

```

DISCRETE SYSTEM FILTER
"FILE CALLED KALMANDI
"
"DISCRETE KALMAN FILTER
"
"AUTHOR SRAF 800721
"
INPUT PSI DELTA ALF KB
"PSI = HEADING ANGLE [DEG]
"DELTA = RUDDER ANGLE [DEG]
"
OUTPUT REST PSIEST
"REST = ESTIMATED YAW RATE [DEG/S]
"PSIEST = ESTIMATED HEADING ANGLE [DEG]
"
STATE RROOF PSIROOF
"RROOF = ESTIMATED YAW RATE [RAD/S]
"PSIROOF = ESTIMATED HEADING ANGLE [RAD]
STATE P11 P12 P22
"
NEW NRROOF NPSIROOF
NEW NP11 NP12 NP22
"
TIME T
TSAMP TS
"
INITIAL
ALFA=180/PI
HVT =0.015*VT *VT +1.5
HVTO=0.015*VTO*VTO+1.5
R1=R10*(HVT/HVTO*HVT/HVTO)
"
OUTPUT
FI11=EXP(-ALF*H)
FI21=(1-FI11)/ALF
GAMMA1=KB*FI21
GAMMA2=KB*(H-FI21)/ALF
"
REST=RROOF*ALFA
PSIEST=PSIROOF*ALFA
"
DYNAMICS
K1=(FI11*P12)/(P22+R2)
K2=(FI21*P12+1*P22)/(P22+R2)
NP11=P11*FI11*FI11-K1*P12*FI11+R1
NP12=P11*FI11*FI21+P12*FI11*1-K1*(P12*FI21+P22*1)
NP22=P11*FI21*FI21+2*P12*FI21+P22*1-K2*(P12*FI21+P22*1)
PSIDIFF=PSI/ALFA-PSIROOF
NRROOF=FI11*RROOF+GAMMA1*DELTA/ALFA+K1*PSIDIFF
NPSIROOF=FI21*RROOF+1*PSIROOF+GAMMA2*DELTA/ALFA+K2*PSIDIFF
TS=T+H
"
"CONSTANTS
PI:3.1415926535
VTO:10 "WIND SPEED AT EXPERIMENT [M/S]
R10:0.0078 "PROCESS DISTURBANCE AT EXPERIMENT [DEG2]
"
"PARAMETERS
VT:5 "WIND SPEED [M/S]
R2:0.0025 "HEADING ANGLE MEASUREMENT NOISE [DEG2]
H :1 "SAMPLING PERIOD [S]
"
END

```

```

DISCRETE SYSTEM REG
"FILE CALLED STURE1
"STANDARD SELF-TUNER BASED ON LEAST SQUARES ESTIMATION AND
"MINIMUM VARIANCE CONTROL - RO FIXED
"
"LIMITATIONS K<=3, DEG R<=2, DEG S<=2
"
"AUTHOR K J ASTROM 800607
"
INPUT Y WAVEK WAVE
OUTPUT U
STATE YD1 YD2 YD3 YD4 USD1 USD2 USD3 USD4
STATE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 FO F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7
STATE P11 P12 P13 P14 P15 P22 P23 P24 P25 P33 P34 P35 P44 P45 P55
NEW NY1 NY2 NY3 NY4 NU1 NU2 NU3 NU4
NEW NT1 NT2 NT3 NT4 NT5 NFO NF1 NF2 NF3 NF4 NF5 NF6 NF7
NEW N11 N12 N13 N14 N15 N22 N23 N24 N25 N33 N34 N35 N44 N45 N55
TIME T
TSAMP TS
"
OUTPUT
"
"COMPUTE PARAMETER ESTIMATES
"
LAM=IF T<LAM1T THEN LMO ELSE 1
E=Y-FO-TH1*F1-TH2*F2-TH3*F3-TH4*F4-TH5*F5
K1=IF DEGS>-0.5 THEN P11*F1+P12*F2+P13*F3+P14*F4+P15*F5 ELSE 0
K2=IF DEGS> 0.5 THEN P12*F1+P22*F2+P23*F3+P24*F4+P25*F5 ELSE 0
K3=IF DEGS> 1.5 THEN P13*F1+P23*F2+P33*F3+P34*F4+P35*F5 ELSE 0
K4=IF DEGR> 0.5 THEN P14*F1+P24*F2+P34*F3+P44*F4+P45*F5 ELSE 0
K5=IF DEGR> 1.5 THEN P15*F1+P25*F2+P35*F3+P45*F4+P55*F5 ELSE 0
D=LAM+F1*K1+F2*K2+F3*K3+F4*K4+F5*K5
T1=IF DEGS>-0.5 THEN TH1+K1*E/D ELSE 0
T2=IF DEGS> 0.5 THEN TH2+K2*E/D ELSE 0
T3=IF DEGS> 1.5 THEN TH3+K3*E/D ELSE 0
T4=IF DEGR> 0.5 THEN TH4+K4*E/D ELSE 0
T5=IF DEGR> 1.5 THEN TH5+K5*E/D ELSE 0
"
"COMPUTE CONTROL VARIABLE
"
US=-T1*Y-T2*YD1-T3*YD2-T4*USD1-T5*USD2
U=US/RO
"
"UPDATE ESTIMATES
"
NT1=T1
NT2=T2
NT3=T3
NT4=T4
NT5=T5
"
"UPDATE COVARIANCE
"
N11=(P11-K1*K1/D)/LAM
N12= P12-K1*K2/D
N13= P13-K1*K3/D
N14= P14-K1*K4/D
N15= P15-K1*K5/D
N22=(P22-K2*K2/D)/LAM
N23= P23-K2*K3/D
N24= P24-K2*K4/D
N25= P25-K2*K5/D
N33=(P33-K3*K3/D)/LAM
N34= P34-K3*K4/D
N35= P35-K3*K5/D

```

```
N44=(P44-K4*K4/D)/LAM
N45= P45-K4*K5/D
N55=(P55-K5*K5/D)/LAM
"
"UPDATE PAST MEASUREMENTS AND CONTROLS
"
NY1=Y
NY2=YD1
NY3=YD2
NY4=YD3
NU1=US
NU2=USD1
NU3=USD2
NU4=USD3
"
"UPDATE REGRESSORS
"
NF00=IF K<1.5 THEN US ELSE IF K<2.5 THEN USD1 ELSE USD2
NF0=IF K<3.5 THEN NF00 ELSE IF K<4.5 THEN USD3 ELSE USD4
NF10=IF K<1.5 THEN Y ELSE IF K<2.5 THEN YD1 ELSE YD2
NF1=IF K<3.5 THEN NF10 ELSE IF K<4.5 THEN YD3 ELSE YD4
NF2=F1
NF3=F2
NF4=F0
NF5=F4
NF6=F3
NF7=F5
"
"UPDATE SAMPLING TIME
"
TS=T+H
"
"PARAMETERS
"
DEGR:1      "DEGREE OF R-POLYNOMIAL <=2
DEGS:1      "DEGREE OF S-POLYNOMIAL <=2
K:2         "TIME DELAY <=3
RO:1        "LEADING COEFFICIENT OF R-POLYNOMIAL
LMO:0.99    "FORGETTING FACTOR
LAM1T:1100
H:10        "SAMPLING PERIOD
"
END
```

```

DISCRETE SYSTEM REG
"FILE CALLED STUREW
"STANDARD SELF-TUNER BASED ON LEAST SQUARES ESTIMATION AND
"MINIMUM VARIANCE CONTROL - RO FIXED
"WAVE IDENTIFICATION - TW KNOWN
"
"LIMITATIONS K<=5, DEG R<=1, DEG S<=1
"
"AUTHOR K J ASTROM 800607
"
INPUT Y
OUTPUT U
STATE YD1 YD2 YD3 YD4 USD1 USD2 USD3 USD4
STATE TH1 TH2 TH3 TH4 TH5 FO F1 F2 F3 F4 F5
STATE P11 P12 P13 P14 P15 P22 P23 P24 P25 P33 P34 P35 P44 P45 P55
NEW NY1 NY2 NY3 NY4 NU1 NU2 NU3 NU4
NEW NT1 NT2 NT3 NT4 NT5 NFO NF1 NF2 NF3 NF4 NF5
NEW N11 N12 N13 N14 N15 N22 N23 N24 N25 N33 N34 N35 N44 N45 N55
TIME T
TSAMP TS
"
INITIAL
"
P11:100
P22:100
P33:100
P44:100
P55:100
OMEGA=2*PI/TW
"
OUTPUT
"
"COMPUTE PARAMETER ESTIMATES
"
E=Y-FO-TH1*F1-TH2*F2-TH3*F3-TH4*F4-TH5*F5
K1=IF DEGS>-0.5 THEN P11*F1+P12*F2+P13*F3+P14*F4+P15*F5 ELSE 0
K2=IF DEGS> 0.5 THEN P12*F1+P22*F2+P23*F3+P24*F4+P25*F5 ELSE 0
K3= P13*F1+P23*F2+P33*F3+P34*F4+P35*F5
K4=IF DEGR> 0.5 THEN P14*F1+P24*F2+P34*F3+P44*F4+P45*F5 ELSE 0
K5= P15*F1+P25*F2+P35*F3+P45*F4+P55*F5
D=LAM+F1*K1+F2*K2+F3*K3+F4*K4+F5*K5
T1=IF DEGS>-0.5 THEN TH1+K1*E/D ELSE 0
T2=IF DEGS> 0.5 THEN TH2+K2*E/D ELSE 0
T3=TH3+K3*E/D
T4=IF DEGR> 0.5 THEN TH4+K4*E/D ELSE 0
T5=TH5+K5*E/D
"
"COMPUTE CONTROL VARIABLE
"
WAVE=T3*SIN(OMEGA*(T+K*H))+T5*COS(OMEGA*(T+K*H))
US=-T1*Y-T2*YD1-T4*USD1-WAVE
U=US/RO
"
"UPDATE ESTIMATES
"
NT1=T1
NT2=T2
NT3=T3
NT4=T4
NT5=T5
"
"UPDATE COVARIANCE
"
N11=(P11-K1*K1/D)/LAM
N12= P12-K1*K2/D
N13= P13-K1*K3/D

```

```

N14= P14-K1*K4/D
N15= P15-K1*K5/D
N22=(P22-K2*K2/D)/LAM
N23= P23-K2*K3/D
N24= P24-K2*K4/D
N25= P25-K2*K5/D
N33=(P33-K3*K3/D)/LAM
N34= P34-K3*K4/D
N35= P35-K3*K5/D
N44=(P44-K4*K4/D)/LAM
N45= P45-K4*K5/D
N55=(P55-K5*K5/D)/LAM
"
"UPDATE PAST MEASUREMENTS AND CONTROLS
"
NY1=Y
NY2=YD1
NY3=YD2
NY4=YD3
NU1=US
NU2=USD1
NU3=USD2
NU4=USD3
"
"UPDATE REGRESSORS
"
NFO0=IF K<1.5 THEN US ELSE IF K<2.5 THEN USD1 ELSE USD2
NFO=IF K<3.5 THEN NFO0 ELSE IF K<4.5 THEN USD3 ELSE USD4
NF10=IF K<1.5 THEN Y ELSE IF K<2.5 THEN YD1 ELSE YD2
NF1=IF K<3.5 THEN NF10 ELSE IF K<4.5 THEN YD3 ELSE YD4
NF2=F1
NF3=SIN(OMEGA*(T+H))
NF4=FO
NF5=COS(OMEGA*(T+H))
"
"UPDATE SAMPLING TIME
"
TS=T+H
"
"PARAMETERS
"
PI:3.1415926535
TW:25.268 "PERIOD TIME (WAVES)
DEGR:1 "DEGREE OF R-POLYNOMIAL <=2
DEGS:1 "DEGREE OF S-POLYNOMIAL <=2
K:2 "TIME DELAY <=3
RO:1 "LEADING COEFFICIENT OF R-POLYNOMIAL
LAM:0.96 "FORGETTING FACTOR
H:10 "SAMPLING PERIOD
"
END

```

```

DISKRETE SYSTEM IDENT
"FILE CALLED IDENT1
"LEAST SQUARE ESTIMATIONS
"
"AUTHOR SRAF 800927
"
INPUT Y
OUTPUT WAVEK WAVE
STATE TH1 TH2 P11 P12 P22
NEW NT1 NT2 NP11 NP12 NP22
TIME T
TSAMP TS
"
INITIAL
P11:100
P22:100
OMEGA=2*PI/TW
"
OUTPUT
"
"COMPUTE REGRESSOR
F1=SIN(OMEGA*T)
F2=COS(OMEGA*T)
"
"COMPUTE PARAMETER ESTIMATES
E=Y-TH1*F1-TH2*F2
K1=P11*F1+P12*F2
K2=P12*F1+P22*F2
D=LAM+F1*K1+F2*K2
T1=TH1+K1*E/D
T2=TH2+K2*E/D
"
"COMPUTE OUTPUT
WAVEK=T1*SIN(OMEGA*(T+DELAY))+T2*COS(OMEGA*(T+DELAY))
WAVE =T1*SIN(OMEGA*T)+T2*COS(OMEGA*T)
"
"UPDATE ESTIMATES
NT1=T1
NT2=T2
"
"UPDATE COVARIANCE
N11=(P11-K1*K1/D)/LAM
N12= P12-K1*K2/D
N22=(P22-K2*K2/D)/LAM
"
"UPDATE SAMPLING TIME
TS=T+H
"
"PARAMETERS
PI :3.1415926535
TW :25.268 "PERIOD TIME
DELAY:50 "DELAY TIME
LAM :0.96 "FORGETTING FACTOR
H :1 "SAMPLING PERIOD
"
END

```

```

DISKRETE SYSTEM IDENT
"FILE CALLED IDENT2
"LEAST SQUARE ESTIMATIONS
"
"AUTHOR SRAF 800930
"
INPUT Y
OUTPUT WAVEK WAVE
STATE TH1 TH2 P11 P12 P22
STATE YD1 YD2 MT TW
NEW NT1 NT2 NP11 NP12 NP22
NEW NY1 NY2 NMT NTW
TIME T
TSAMP TS
"
INITIAL
P11:100
P22:100
"
OUTPUT
"
"COMPUTE REGRESSOR
OMEGA=2*PI/TW
F1=SIN(OMEGA*T)
F2=COS(OMEGA*T)
"
"COMPUTE PARAMETER ESTIMATES
E=Y-TH1*F1-TH2*F2
K1=P11*F1+P12*F2
K2=P12*F1+P22*F2
D=LAM+F1*K1+F2*K2
T1=TH1+K1*E/D
T2=TH2+K2*E/D
"
"COMPUTE OUTPUT
WAVEK=T1*SIN(OMEGA*(T+DELAY))+T2*COS(OMEGA*(T+DELAY))
WAVE =T1*SIN(OMEGA*T)+T2*COS(OMEGA*T)
"
"UPDATE ESTIMATES
NT1=T1
NT2=T2
NOEST=Y>YD1 OR YD2>YD1
DT=T-MT
NTW=IF NOEST THEN TW ELSE TW*F+(1-F)*DT
NMT=IF NOEST THEN MT ELSE T
"
"UPDATE COVARIANCE
N11=(P11-K1*K1/D)/LAM
N12= P12-K1*K2/D
N22=(P22-K2*K2/D)/LAM
"
"UPDATE MEASUREMENTS
NY1=Y
NY2=YD1
"
"UPDATE SAMPLING TIME
TS=T+H
"
"PARAMETERS
PI :3.1415926535
DELAY:50 "DELAY TIME
LAM :0.96 "FORGETTING FACTOR
F :0.99 "FILTER CONSTANT
H :1 "SAMPLING PERIOD
"
END

```



```
CONNECTING SYSTEM CON
"FILE CALLED STATECON
"
TIME T
YR=IF T<STEP THEN 0 ELSE 1
PSI[REG]=PSIDEG[PROC]-YR+E1[NOISE1]
R[REG]=RDEG[PROC]
ALF[REG]=ALF[PROC]
K[REG]=K[PROC]
DELTA[PROC]=U[REG]
"
STEP:100
"
END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON
"FILE CALLED ESTCON
"
"
TIME T
YR=IF T<STEP THEN 0 ELSE 1
PSI[FILTER]=PSIDEG[PROC]+E1[NOISE1]
DELTA[FILTER]=U[REG]
ALF[FILTER]=ALF[PROC]
KB[FILTER]=K[PROC]
PSI[REG]=PSIDEG[PROC]-YR
R[REG]=REST[FILTER]
ALF[REG]=ALF[PROC]
K[REG]=K[PROC]
"
STEP:100
"
END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON  
"FILE CALLED ADAPTCON  
"
```

```
TIME T  
YR=0  
Y[REG]=PSIDEG[PROC]-YR  
DELTA[PROC]=U[REG]  
"  
END
```

```
CONNECTING SYSTEM CON  
"FILE CALLED IDENTCON  
"
```

```
TIME T  
YR=0  
Y[REG]=PSIDEG[PROC]-YR  
Y[IDENT]=PSIDEG[PROC]-YR  
WAVEK[REG]=WAVEK[IDENT]  
WAVE[REG]=WAVE[IDENT]  
DELTA[PROC]=U[REG]  
"  
END
```

```
program matrix;
```

```
var kb,alfa,ts,rho : real;
    fi1,fi2       : real;
    g1,g2         : real;
    s1,s2,s3      : real;
    n1,n2,n3      : real;
    x,y,z         : real;
    log           : char;
    eps           : real;
```

```
begin
```

```
  write('Enter eps  :'); readln(eps);
  write('Enter kb   :'); readln(kb);
  write('Enter alfa :'); readln(alfa);
  write('Enter tsamp:'); readln(ts);
  write('Enter rho  :'); readln(rho);
  write('Log? Y/N   '); readln(log);
  write('Enter s1   :'); readln(n1);
  write('Enter s2   :'); readln(n2);
  write('Enter s3   :'); readln(n3);
  fi1:=exp(-alfa*ts);
  fi2:=(1-fi1)/alfa;
  g1:=kb*fi2;
  g2:=kb*(ts-fi2)/alfa;
  repeat
    s1:=n1; s2:=n2; s3:=n3;
    x:=s1*g1*g1+2*s2*g1*g2+s3*g2*g2+rho;
    y:=s1*fi1*g1+s2*(g1*fi2+g2*fi1)+s3*fi2*g2;
    z:=s2*g1+s3*g2;
    n1:=s1*fi1*fi1+2*s2*fi1*fi2+s3*fi2*fi2-y*y/x;
    n2:=s2*fi1+s3*fi2-y*z/x;
    n3:=s3+1-z*z/x;
    if log='Y' then writeln(n1,n2,n3);
  until (abs(1-s1/n1)<eps) and (abs(1-s2/n2)<eps) and (abs(1-s3/n3)<eps);
  writeln('L1=',y/x:10:7);
  writeln('L2=',z/x:10:7);
```

```
end.
```

```

program sopfb3;
const n=6;
type matrix=array[1..n,1..n] of real;
      vector=array[1..n] of real;
var j:matrix;
    s,q,f:vector;
    i:integer;
    zero,eps,rho:real;
    k1,k2,alfa1,alfa2,alfa3,alfa4:real;
    ready:boolean;
    answer,log:char;

procedure crout(a:matrix;var x:vector;b:vector;n:integer);
var lr:matrix;
    z:vector;
    i,j,k:integer;
begin
  for k:=1 to n do
  begin
    for i:=k to n do
    begin
      lr[i,k]:=a[i,k];
      for j:=1 to k-1 do lr[i,k]:=lr[i,k]-lr[i,j]*lr[j,k];
    end;
    for i:=k+1 to n do
    begin
      lr[k,i]:=a[k,i];
      for j:=1 to k-1 do lr[k,i]:=lr[k,i]-lr[k,j]*lr[j,i];
      if lr[k,k]=0 then begin
        lr[k,k]:=zero; writeln('LR(',k:1,')=0');
      end;
      lr[k,i]:=lr[k,i]/lr[k,k];
    end;
  end;
  for i:=1 to n do
  begin
    z[i]:=b[i];
    for j:=1 to i-1 do z[i]:=z[i]-lr[i,j]*z[j];
    if lr[i,i]=0 then begin
      lr[i,i]:=zero; writeln('LR(',i:1,')=0');
    end;
    z[i]:=z[i]/lr[i,i];
  end;
  for i:=n downto 1 do
  begin
    x[i]:=z[i];
    for j:=i+1 to n do x[i]:=x[i]-lr[i,j]*x[j];
  end;
end;

begin repeat
  write('Enter eps :'); readln(eps);
  write('Enter zero :'); readln(zero);
  write('Enter rho :'); readln(rho);

```

```

write('Standard? '); readln(answer);
if answer='Y' then
begin
  k1 := -5.9800E-4;
  k2 := 2.6383E-2;
  alfa1 := -3.9931E-2;
  alfa2 := -1.2904E-4;
  alfa3 := -3.5878 ;
  alfa4 := -9.8606E-4;
end else
begin
  write('Enter k1 '); readln(k1);
  write('Enter k2 '); readln(k2);
  write('Enter alfa1:'); readln(alfa1);
  write('Enter alfa2:'); readln(alfa2);
  write('Enter alfa3:'); readln(alfa3);
  write('Enter alfa4:'); readln(alfa4);
end;
write('Start value?'); readln(answer);
if answer='Y' then
begin
  write('Enter s1 '); readln(s[1]);
  write('Enter s2 '); readln(s[2]);
  write('Enter s3 '); readln(s[3]);
  write('Enter s4 '); readln(s[4]);
  write('Enter s5 '); readln(s[5]);
  write('Enter s6 '); readln(s[6]);
end else for i:=1 to n do s[i]:=0;
write('Log? '); readln(log);
repeat
  j[1,1]:=rho;
  j[1,2]:=rho*alfa1-s[4]*k1*k1-s[5]*k1*k2;
  j[1,3]:=rho*alfa3-s[4]*k1*k2-s[5]*k2*k2;
  j[1,4]:=-s[2]*k1*k1-s[3]*k1*k2;
  j[1,5]:=-s[2]*k1*k2-s[3]*k2*k2;
  j[1,6]:=0;
  j[2,1]:=0;
  j[2,2]:=-2*s[2]*k1*k1-2*s[3]*k1*k2;
  j[2,3]:=-2*s[2]*k1*k2-2*s[3]*k2*k2;
  j[2,4]:=0;
  j[2,5]:=0;
  j[2,6]:=0;
  j[3,1]:=0;
  j[3,2]:=rho*alfa2-s[5]*k1*k1-s[6]*k1*k2;
  j[3,3]:=rho*alfa4-s[5]*k1*k2-s[6]*k2*k2;
  j[3,4]:=0;
  j[3,5]:=-s[2]*k1*k1-s[3]*k1*k2;
  j[3,6]:=-s[2]*k1*k2-s[3]*k2*k2;
  j[4,1]:=0;
  j[4,2]:=2*rho;
  j[4,3]:=0;
  j[4,4]:=2*rho*alfa1-2*s[4]*k1*k1-2*s[5]*k1*k2;
  j[4,5]:=2*rho*alfa3-2*s[4]*k1*k2-2*s[5]*k2*k2;
  j[4,6]:=0;

```

```

j[5,1]:=0;
j[5,2]:=0;
j[5,3]:=rho;
j[5,4]:=rho*alfa2-s[5]*k1*k1-s[6]*k1*k2;
j[5,5]:=rho*(alfa1+alfa4)-s[4]*k1*k1-2*s[5]*k1*k2-s[6]*k2*k2;
j[5,6]:=rho*alfa3-s[4]*k1*k2-s[5]*k2*k2;
j[6,1]:=0;
j[6,2]:=0;
j[6,3]:=0;
j[6,4]:=0;
j[6,5]:=2*rho*alfa2-2*s[5]*k1*k1-2*s[6]*k1*k2;
j[6,6]:=2*rho*alfa4-2*s[5]*k1*k2-2*s[6]*k2*k2;
f[1]:=rho*(s[1]+alfa1*s[2]+alfa3*s[3])-
(s[2]*s[4]*k1*k1+s[3]*s[4]*k1*k2+s[2]*s[5]*k1*k2+s[3]*s[5]*k2*k2);
f[2]:=rho-(s[2]*s[2]*k1*k1+2*s[2]*s[3]*k1*k2+s[3]*s[3]*k2*k2);
f[3]:=rho*(alfa2*s[2]+alfa4*s[3])-
(s[2]*s[5]*k1*k1+s[3]*s[5]*k1*k2+s[2]*s[6]*k1*k2+s[3]*s[6]*k2*k2);
f[4]:=2*rho*(s[2]+alfa1*s[4]+alfa3*s[5])-
(s[4]*s[4]*k1*k1+2*s[4]*s[5]*k1*k2+s[5]*s[5]*k2*k2);
f[5]:=rho*(s[3]+alfa1*s[5]+alfa3*s[6]+alfa2*s[4]+alfa4*s[5])-
(s[4]*s[5]*k1*k1+s[5]*s[5]*k1*k2+s[4]*s[6]*k1*k2+s[5]*s[6]*k2*k2);
f[6]:=2*rho*(alfa2*s[5]+alfa4*s[6])-
(s[5]*s[5]*k1*k1+2*s[5]*s[6]*k1*k2+s[6]*s[6]*k2*k2);
for i:=1 to n do f[i]:=-f[i];
crout(j,q,f,n);
for i:=1 to n do s[i]:=s[i]+q[i];
if log='Y' then begin
  for i:=1 to n do write(s[i]);
  writeln;
end;
ready:=true;
for i:=1 to n do ready:=ready and (abs(q[i]/s[i])<eps);
until ready;
for i:=1 to n do write(s[i]);
writeln;
for i:=1 to n do write(f[i]);
writeln; writeln;
writeln('L1=',(k1*s[2]+k2*s[3])/rho);
writeln('L2=',(k1*s[4]+k2*s[5])/rho);
writeln('L3=',(k1*s[5]+k2*s[6])/rho);
writeln;
write('Try again? '); readln(answer);
until answer<>'Y';
end.

```

```

program pkalm2;
const n=3;
type matrix=array[1..n,1..n] of real;
      vector=array[1..n] of real;
var j:matrix;
    p,q,f:vector;
    i:integer;
    zero,eps:real;
    k,alfa,r1,r2:real;
    ready:boolean;
    answer,log:char;

procedure crout(a:matrix;var x:vector;b:vector;n:integer);
var lr:matrix;
    z:vector;
    i,j,k:integer;
begin
  for k:=1 to n do
  begin
    for i:=k to n do
    begin
      lr[i,k]:=a[i,k];
      for j:=1 to k-1 do lr[i,k]:=lr[i,k]-lr[i,j]*lr[j,k];
    end;
    for i:=k+1 to n do
    begin
      lr[k,i]:=a[k,i];
      for j:=1 to k-1 do lr[k,i]:=lr[k,i]-lr[k,j]*lr[j,i];
      if lr[k,k]=0 then begin
        lr[k,k]:=zero; writeln('LR(',k:1,')=0');
      end;
      lr[k,i]:=lr[k,i]/lr[k,k];
    end;
  end;
  for i:=1 to n do
  begin
    z[i]:=b[i];
    for j:=1 to i-1 do z[i]:=z[i]-lr[i,j]*z[j];
    if lr[i,i]=0 then begin
      lr[i,i]:=zero; writeln('LR(',i:1,')=0');
    end;
    z[i]:=z[i]/lr[i,i];
  end;
  for i:=n downto 1 do
  begin
    x[i]:=z[i];
    for j:=i+1 to n do x[i]:=x[i]-lr[i,j]*x[j];
  end;
end;

begin repeat
  write('Enter eps  :'); readln(eps);
  write('Enter zero :'); readln(zero);
  write('Standard?   '); readln(answer);

```

```

if answer='Y' then
begin
  k :=-1.71474E-4;
  alfa:=-1.27586E-3;
  r1 := 3.05000E-3;
  r2 := 2.50000E-3;
end else
begin
  write('Enter k   :'); readln(k);
  write('Enter alfa :'); readln(alfa);
  write('Enter r1   :'); readln(r1);
  write('Enter r2   :'); readln(r2);
end;
write('Start value?'); readln(answer);
if answer='Y' then
begin
  write('Enter p1   :'); readln(p[1]);
  write('Enter p2   :'); readln(p[2]);
  write('Enter p3   :'); readln(p[3]);
end else
begin
  p[1]:=1; p[3]:=1; p[2]:=0;
end;
write('Log?      '); readln(log);
repeat
  j[1,1]:=-2*r2*alfa;
  j[1,2]:=-2*p[2];
  j[1,3]:=0;
  j[2,1]:=r2;
  j[2,2]:=-r2*alfa-p[3];
  j[2,3]:=-p[2];
  j[3,1]:=0;
  j[3,2]:=2*r2;
  j[3,3]:=-2*p[3];
  f[1]:=-2*r2*alfa*p[1]+r1*r2-p[2]*p[2];
  f[2]:=r2*(-alfa*p[2]+p[1])-p[2]*p[3];
  f[3]:=2*r2*p[2]-p[3]*p[3];
  for i:=1 to n do f[i]:=-f[i];
  crout(j,q,f,n);
  for i:=1 to n do p[i]:=p[i]+q[i];
  if log='Y' then begin
    for i:=1 to n do write(p[i]);
    writeln;
  end;
  ready:=true;
  for i:=1 to n do ready:=ready and (abs(q[i]/p[i])<eps);
until ready;
for i:=1 to n do write(p[i]);
writeln;
for i:=1 to n do write(f[i]);
writeln; writeln;
writeln('L1=',p[2]/r2);
writeln('L2=',p[3]/r2);
writeln;
write('Try again? '); readln(answer);
until answer<>'Y';
end.

```


REFERENSLISTA

- [1] Källström, Claes G (1979)
Identification and Adaptive Control Applied to Ship
Steering, May 1979. TFRT-1018, Dept of Automatic
Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [2] Aström, K.J. (1980)
Self-tuning Regulators - Design Principles and
Applications in Narendra, K.S and Monopoli, R.V (eds)
Applications of Adaptive Control, Academic Press 1980.
- [3] Aström, K.J.
Simulation of an Adaptive Autopilot. Dept of Automatic
Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.